

Nassmechanische Aufbereitung der Feinfraktion von Deponat mit dem Ziel der Erzeugung verwertbarer Stoffströme

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Sebastian, Wanka
geboren am 24. September 1980
aus Leisnig

Eingereicht am: 01. Februar 2017

Disputation am: 02. August 2017

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K. Fricke
Prof. Dr.-Ing. D. Goldmann

2017

Danksagung:

Die vorliegende Arbeit wurde am Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilung Abfall- und Ressourcenwirtschaft der Technischen Universität Braunschweig unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Fricke angefertigt. Ihm gilt mein Dank für die Vergabe des interessanten Promotionsthemas, die Betreuung, die Anregungen und konstruktiven Vorschläge sowie für die Möglichkeiten das Promotionsthema auf nationalen und internationalen Tagungen vorzustellen.

Bedanken möchte ich mich recht herzlich bei meinen Kolleginnen und Kollegen für die angenehme Atmosphäre sowie die zahlreichen Diskussionen und vielfältige Beteiligung während der Jahre am Institut. Besonderer Dank gilt dabei Herrn Anton Zeiner für die tatkräftige Unterstützung während der praktischen Versuchsdurchführungen. Ich danke außerdem Herrn Dr.-Ing. Kai Münnich für die interessanten Anregungen, seine konstruktive Kritik und sein großes Engagement während der Bearbeitung dieser Dissertation. Weiterhin möchte ich mich bei Frau M. Sc. Andrea Pfeiffer sehr herzlich bedanken, die mir jederzeit hilfsbereit und motivierend zur Seite stand.

Mein Dank gilt weiterhin meinen studentischen Hilfskräften und Studierenden, die im Rahmen von Bachelor, Studien- oder Masterarbeiten und durch Ihr Engagement einen wesentlichen Beitrag zum Entstehen dieser Arbeit geleistet haben.

Ich bedanke mich recht herzlich bei den Mitarbeitern der AGS Anlagen und Verfahren GmbH sowie bei den Mitarbeitern des Entsorgungszentrums Pohlsche Heide für Ihren engagierten Einsatz.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, die mir diesen Weg ermöglicht und mich stets gefördert haben. Auch möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Andrea und meinem Freundeskreis für die Geduld, Ablenkung und liebevolle Unterstützung bedanken.

Braunschweig, den 16.08.2017

Sebastian Wanka

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	XIII
Tabellenverzeichnis.....	XVI
Abkürzungsverzeichnis.....	XIX
1 Einleitung und Zielstellung.....	1
2 Grundlagen	3
2.1 Deponierückbau	3
2.1.1 Definition.....	3
2.1.2 Ziele und Hemmnisse	4
2.1.3 Status Quo.....	6
2.1.4 Ökonomische/ ökologische Vorteilhaftigkeit von Rückbaumaßnahmen.....	7
2.1.5 Durchführung Deponierückbau	7
2.2 Deponiebürtige Wertstoffe.....	11
2.2.1 Rohstoffsituation	11
2.2.2 Verwertbare Stoffströme aus Deponien	12
2.2.3 Theoretisches Wertstoffpotenzial in Siedlungsabfalldeponien	14
2.3 Einflussfaktoren auf das Wertstoffpotenzial in Siedlungsabfalldeponien.....	15
2.3.1 Technische Gewinnbarkeit und Charakterisierung deponiebürtiger Wertstoffe	17
2.4 Verwertung und Beseitigung deponiebürtiger Stoffströme.....	20
2.4.1 Voraussetzung für die Verwertung von Abfallstoffen	20
2.4.2 Verwertung der heizwertreichen Fraktionen.....	21
2.4.3 Verwertung der mineralischen Stoffströme.....	24
2.4.4 Kunststoffrecycling.....	33
2.4.5 Metallrecycling	33
2.4.6 Glasrecycling	34
2.4.7 Verwertung nativ organischer Fraktionen.....	34
2.4.8 Wiederablagerung von Reststoffen	34
2.5 Aufbereitung der Feinfraktion	35
2.5.1 Auswahl geeigneter Sortierverfahren zur Aufbereitung der Feinfraktion.....	35
2.5.2 Trockene Sortierverfahren	36
2.5.3 Nasse Sortierverfahren	36
2.5.4 Fazit.....	38
2.6 Nasssetzen	39
2.6.1 Grundlagen des Nasssetzens	39
2.6.2 Aufbau von Nasssetzmaschinen	41
2.6.3 Betriebsparameter von Nasssetzmaschinen	42

2.6.4	Einflussfaktoren auf den Setzprozess	43
2.6.5	Einsatz von Nasssetzmaschinen in der Praxis	45
2.7	Schlussfolgerungen.....	46
3	Material und Methoden.....	47
3.1	Ausgangsmaterialien.....	47
3.1.1	Deponie Pohlsche Heide.....	47
3.1.2	Materialentnahme	48
3.2	Versuchsaufbau zur nassmechanischen Aufbereitung	50
3.2.1	Verfahrenskonzept.....	50
3.2.2	Versuchsanlage	50
3.2.3	Versuchsdurchführung	54
3.2.4	Versuchsvarianten	56
3.3	Prozessbewertung	56
3.4	Mess- und Analysemethoden zur Produkt- und Stoffstrombewertung	59
3.4.1	Probenahme- Lagerung und Aufbereitung	59
3.4.2	Siebanalysen	60
3.4.3	Standardisierte Mess- und Analysemethoden	60
3.4.4	Erweiterte Stoffstromaufbereitung	62
3.5	Ökonomische Betrachtungen	62
3.6	Ökologische Bewertung	63
3.7	Statistische Auswertung	64
4	Ergebnisse und Auswertung.....	65
4.1	Charakterisierung des rückgebauten Deponates.....	65
4.1.1	Korngrößenverteilung und stoffliche Zusammensetzung - Gesamtfraktion des Rückbaugutes	65
4.1.2	Korngrößenverteilung und stoffliche Zusammensetzung - Feinfraktion < 60 mm des Rückbaugutes	68
4.1.3	Biologische Aktivität und biologisches Abbaupotenzial	72
4.1.4	Schadstoffe im Eluat	73
4.1.5	Asbest.....	76
4.1.6	Oberflächenanhaftungen.....	76
4.2	Massenbilanzierung der nassmechanischen Aufbereitung	80
4.3	Charakteristik der Austragsgüter aus der nassmechanischen Aufbereitung ...	82
4.3.1	Glühverlust und stoffliche Zusammensetzung der Austragsgüter des Aufgabegutes < 25 mm	82
4.3.2	Glühverlust und stoffliche Zusammensetzung der Austragsgüter des Aufgabegutes < 60 mm	83
4.3.3	Glühverlust und stoffliche Zusammensetzung der Austragsgüter des Aufgabegutes 10 - 60 mm.....	84

4.3.4	Sortiergüte des Aufbereitungsprozesses.....	86
4.3.5	Schadkomponenten in den Austragsgütern.....	87
4.3.6	Schadstoffpfade im Aufbereitungsprozess < 60 mm	90
4.4	Reinigungsleistung des Waschvorganges	95
4.5	Charakteristik der Austragsgüter aus dem Aufgabegut 10 - 60 mm – Produktbezogen	97
4.5.1	Schwergutaustrag 10 - 60 mm	97
4.5.2	Feingutaustrag aus der Aufbereitung des Aufgabegutes 10 - 60 mm	111
4.5.3	Leichtgutaustrag 10 - 60 mm	123
4.5.4	Bodenfraktion < 10 mm	134
4.6	Prozesswasser	141
5	Ökonomische und ökologische Bewertung	147
5.1	Definition des Betrachtungsraumes	147
5.2	Ökonomische Bewertungen des Konzeptes	152
5.2.1	Variable Kosten und Kapitalkosten	152
5.2.2	Einfluss der Erlöse und Entsorgungskosten	154
5.2.3	Wirtschaftliche Bedeutung der Gewinnung von Deponievolumen und des Flächenrecyclings.....	156
5.2.4	Variation verschiedener Einflussgrößen auf die Wirtschaftlichkeit der Feinaufbereitung	157
5.3	Ökologische Bewertungen des Konzeptes	157
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	163
7	Literatur	167
8	Anhang.....	179

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Vorkonditionierung, schematisch	9
Abbildung 2-2: Produktorientierte Stoffstromtrennung, schematisch.....	10
Abbildung 2-3: Geschätzte Mengen deponierter Wertstoffe (Mocker et al., 2009b)	14
Abbildung 2-4: Ausgewählte Wertstoffpotenziale nach Rettenberger (2009)	15
Abbildung 2-5: Hausmüllzusammensetzung in der BRD vor 1989 (Oschlies, 1989)	17
Abbildung 2-6: Regelwerke Gesteinskörnungen im Straßen- und Erbau (Klein, 2010)	29
Abbildung 2-7: Wirkprinzip der Sortierung durch Setzen (Schubert, 2008)	41
Abbildung 2-8: Prinzipieller Aufbau der verwendeten Nasssetzmaschine (AGS, 2014)	41
Abbildung 3-1: Mengen zu deponierender Abfälle (Fricke et al., 2016a).....	47
Abbildung 3-2: Schurfe und Ablagerungszeiträume (Fricke et al., 2016a).....	49
Abbildung 3-3: Aufbereitung des Deponates (Krüger et al., 2016)	49
Abbildung 3-4: Schematische Darstellung der Versuchsanlage (AGS, 09.2013).	50
Abbildung 4-1: Sieblinien des Deponats < 140 mm	66
Abbildung 4-2: Frischmaterial, bezogen auf die Trockensubstanz (Feinmaterial < 60 mm, Schurf K 1).....	67
Abbildung 4-3: Sieblinie für Nass- und Trockensiebung gegenüber der Siebung mit Frischmaterial, bezogen auf die Trockensubstanz (Feinmaterial < 60 mm, Schurf K 2).....	67
Abbildung 4-4: Stoffliche Zusammensetzung des Gesamtdeponates	67
Abbildung 4-5: Mittlere Deponatzusammensetzung aus 60 Rückbauprojekten (Van Vossen und Prent, 2011)	68
Abbildung 4-6: Feinfraktion < 60 mm (Mischprobe)	69
Abbildung 4-7: Glühverluste der Feinfraktion, unterteilt nach Kornfraktionen.....	69
Abbildung 4-8: Stoffliche Zusammensetzung der Feinfraktion < 60 mm	70
Abbildung 4-9: Verteilung der heizwertreichen Fraktion im Deponat.....	70
Abbildung 4-10: Werstoffanteile Schurf K 1, gewichtet nach Massenanteil.....	71
Abbildung 4-11: Werstoffanteile Schurf K 2, gewichtet nach Massenanteil	71
Abbildung 4-12: Sieblinie der Anhaftungen des Aufgabegutes	77
Abbildung 4-13: Glühverlust der Anhaftungen des Aufgabegutes.....	77
Abbildung 4-14: TOC- Gehalte der Anhaftungen des Aufgabegutes.....	78
Abbildung 4-15: TOC-Gehalte der Anhaftungen des Aufgabegutes nach Trägermaterial ..	78
Abbildung 4-16: Massenbilanz - Aufbereitung von Deponat < 25 mm – Angaben bezogen auf TS.....	80
Abbildung 4-17: Massenbilanz - Aufbereitung von Deponat < 60 mm – Angaben bezogen auf TS.....	81

Abbildung 4-18: Massenbilanz - Aufbereitung von Deponat 10 - 60 mm – Angaben bezogen auf TS.....	81
Abbildung 4-19: Glühverluste der Stoffströme aus dem Aufgabegut < 25 mm	83
Abbildung 4-20: Stoffliche Zusammensetzung des Schwergutaustrages aus dem Aufgabegut < 25 mm.....	83
Abbildung 4-21: Glühverluste der Stoffströme aus dem Aufgabegut < 60 mm	84
Abbildung 4-22: Stoffliche Zusammensetzung des Schwergutaustrages aus dem Aufgabegut < 60 mm.....	84
Abbildung 4-23: Glühverluste der Stoffströme aus dem Aufgabegut 10 - 60 mm	85
Abbildung 4-24: Stoffliche Zusammensetzung des Schwergutaustrages aus dem Aufgabegut 10 - 60 mm.....	85
Abbildung 4-25: Organische Schadstoffe im Feststoff, Teil I.....	90
Abbildung 4-26: Schwermetalle im Feststoff (Auszug), Teil I	91
Abbildung 4-27: Salzkonzentrationen im Eluat	93
Abbildung 4-28: Schwermetalle im Eluat (Auszug)	94
Abbildung 4-29: Schwergutaustrag.....	97
Abbildung 4-30: Sieblinie des Schwergutaustrages	98
Abbildung 4-31: Relative Häufigkeit der Massenanteile des Schwergutaustrages	98
Abbildung 4-32: Stoffliche Zusammensetzung des Schwergutaustrages, differenziert nach Siebschnitten	99
Abbildung 4-33: Verteilung der Hauptbestandteile des Schwergutaustrages	100
Abbildung 4-34: Glühverlust des Schwergutaustrages, differenziert nach Siebschnitten	100
Abbildung 4-35: Sieblinie des Schwergutes nach TL-Gestein.....	103
Abbildung 4-36: Feingutaustrag als Frischsubstanz	111
Abbildung 4-37: Sieblinie des Feingutaustrages	111
Abbildung 4-38: relative Häufigkeit der Massenanteile des Feingutaustrages	112
Abbildung 4-39: Glühverlust des Feingutaustrages, differenziert nach Siebschnitten	112
Abbildung 4-40: Sieblinie des Feingutaustrages nach TL-Gestein	114
Abbildung 4-41: Reduktion des Glühverlustes des Feingutaustrages infolge Sanwäsche	118
Abbildung 4-42: Einfluss der Sandwäsche auf den Feingutaustrag am Beispiel der elektrischen Leitfähigkeit im Eluat	119
Abbildung 4-43: Einfluss der Sandwäsche auf den Feingutaustrag am Beispiel des Sulfatgehaltes im Eluat	119
Abbildung 4-44: Sieblinie des Feingutaustrages (gewaschen/ ungewaschen)	120
Abbildung 4-45: Massenanteil des Feingutaustrages (gewaschen/ ungewaschen).....	120

Abbildung 4-46: Magnetisierbare Komponenten im Feingutaustrag (50-fach vergrößert)	121
Abbildung 4-47: Eisenanteil der magnetisierbaren Komponenten des Feingutaustrages	121
Abbildung 4-48: Leichtgutaustrag als Frischsubstanz	123
Abbildung 4-49: Sieblinie des Leichtgutaustrages	124
Abbildung 4-50: Relative Häufigkeit der Massenanteile des Leichtgutaustrages	124
Abbildung 4-51: Stoffliche Zusammensetzung des Leichtgutaustrages	125
Abbildung 4-52: Stoffliche Zusammensetzung des Leichtgutaustrages, differenziert nach Siebschnitten	125
Abbildung 4-53: Glühverlust des Leichtgutaustrages, differenziert nach Siebschnitten....	126
Abbildung 4-54: Bodenfraktion < 10 mm.....	134
Abbildung 4-55: Sieblinie der Bodenfraktion	134
Abbildung 4-56: Relative Häufigkeit der Massenanteile der Bodenfraktion	135
Abbildung 4-57: Glühverluste der Bodenfraktion, differenziert nach Siebschnitten	135
Abbildung 4-58: Prozesswasser aus der Aufbereitung des Aufgabegutes 10 - 60 mm (links: Prozesswasser; rechts: Prozesswasser nach 17 h Standzeit)....	141
Abbildung 4-59: Sieblinie der Prozesswasserfeststoffe	144
Abbildung 4-60: Relative Häufigkeit der Prozesswasserfeststoffe	144
Abbildung 4-61: Glühverluste der Feststoffe im Prozesswasser, differenziert nach Siebschnitten	145
Abbildung 5-1: Verfahrenskonzept und Untersuchungsrahmen	148
Abbildung 5-2: Variation der Erlöse inerter Stoffströme	155
Abbildung 5-3: Variation der Verwertungskosten/ Erlöse des Leichtgutaustrages.....	155
Abbildung 5-4: Variation des Deponievolumenwertes.....	156
Abbildung 5-5: Ökologische Auswirkungen „Treibhauspotenzial“	161
Abbildung 5-6: Ökologische Auswirkungen „Versauerungspotenzial“	161
Abbildung 5-7: Ökologische Auswirkungen „KEA-fossil“	162

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Kategorisierung des Urban Mining nach Mocker et al. (2009a)	3
Tabelle 2-2: Rückbau von Deponien (Ministerium für Umwelt und Forsten, 1996), zitiert bei (DWA, 2002).....	8
Tabelle 2-3: Trennschnitte bei verschiedenen Rückbauprojekten.....	9
Tabelle 2-4: Statische Reichweiten ausgewählte Primärrohstoffe in Jahren (BWK, 2009).....	11
Tabelle 2-5: Verwertungswege deponiebürtiger Stoffströme (Hölzle, 2010b), verändert und ergänzt aus Krüger et al. (2016).....	13
Tabelle 2-6: Wiedergewinnungsraten und Reinheitsgrade deponiebürtiger Wertstoffe (Strange, 2010).....	18
Tabelle 2-7: Qualitätsanforderungen für Ersatzbrennstoffe aus frei verfügbaren Quellen (Krüger et al., 2016), verändert.....	23
Tabelle 2-8: Bedarf an Gesteinskörnungen in Deutschland (KrW- Bau, 2015).....	24
Tabelle 2-9: Recyclingbaustoff- Produktion in Deutschland (KrW- Bau, 2015).....	24
Tabelle 2-10: Verwertungswege für Recyclingbaustoffe in Deutschland (KrW- Bau, 2015).....	25
Tabelle 2-11: Zuordnungswerte für RC-Baustoffe und nicht aufbereiteten Bauschutt (LAGA, 2012).....	27
Tabelle 2-12: Abweichende Anforderungen zwischen LAGA M 20 und TL-Gestein.....	28
Tabelle 2-13: Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von RC-Baustoffen.....	30
Tabelle 2-14: Bautechnische Anforderungen an RC Material (TL-Gestein-StB 04, 2007), Anhang E	31
Tabelle 2-15: Sortierverfahren in der Bauschuttaufbereitung (Umweltbundesamt, 2012)...	35
Tabelle 2-16: Vergleich nasser/ trockener Sortierverfahren (Kurkowski und Penzel, 1997)	39
Tabelle 3-1: Prozessparameter der Nasssetzmaschine.....	52
Tabelle 3-2: Versuchsdurchführungen und verwendetes Material	56
Tabelle 3-3: Probenplan zur Analyse umweltrelevanter Parameter nach LAGA M 20.....	61
Tabelle 3-4: Stoffströme der nassmechanischen Aufbereitung	63
Tabelle 4-1: Trockensubstanz-, Glühverlust- und TOC-Gehalte der Feinfraktion < 60 mm (Auszug)	69
Tabelle 4-2: Nährstoffgehalte der Feinfraktion < 60 mm	71
Tabelle 4-3: Biologische Qualitätskennwerte der Feinfraktion < 60 mm und Grenzwerte der DepV (2016).....	72
Tabelle 4-4: Zusammensetzung der enthaltenen organischer Substanz (Van-Soest-Analyse).....	73

Tabelle 4-5: Eluatwerte sowie extrahierbare lipophile Stoffe der Feinfraktion < 60 mm und Grenzwerte der DepV (2016) - Schurf K 1.....	73
Tabelle 4-6: Ablagerungskriterien für Feinmaterial < 60 mm - Schurf K 2	75
Tabelle 4-7 : Massenanteil der Anhaftungen des Aufgabegutes	76
Tabelle 4-8: Schwermetallgehalte der Anhaftungen des Aufgabegutes	79
Tabelle 4-9: Schwermetallgehalte der Anhaftungen des Aufgabegutes unterschiedlicher Trägermaterialien	79
Tabelle 4-10: Fremdstoffgehalte im Schwergut- und Leichtgutaustrag	87
Tabelle 4-11: Qualitätskennwerte der Schwergutausträge sowie Einbauklassen und Zuordnungskriterien nach LAGA M 20 (2012).....	88
Tabelle 4-12: Qualitätskennwerte der Feingutausträge sowie Einbauklassen und Zuordnungskriterien nach LAGA M 20 (2012).....	89
Tabelle 4-13: Reinigungsleistung der nassmechanischen Aufbereitung am Beispiel des Schwergutes	96
Tabelle 4-14: Fremdstoffgehalte im Schwergutaustrag, differenziert nach Siebschnitten	100
Tabelle 4-15: Stoffliche Zusammensetzung des Schwergutaustrages nach TL-Gestein	102
Tabelle 4-16: Bautechnische Eigenschaften des Schwergutaustrages nach TL-Gestein	104
Tabelle 4-17: bautechnische Zwecke eng gestufter Kiese (DIN 18196, 2011)	107
Tabelle 4-18: Schwermetallgehalte der Anhaftungen des Schwergutaustrages.....	108
Tabelle 4-19: Stoffliche Zusammensetzung des Feingutaustrages nach TL-Gestein	114
Tabelle 4-20: Bautechnische Eigenschaften des Feingutaustrages nach TL-Gestein	115
Tabelle 4-21: Bodenklassifizierung von Sand- Schluff- Gemischen mit hohem Feinanteil für bautechnische Zwecke (DIN 18196, 2011).....	117
Tabelle 4-22: Fremdstoffgehalte im Leichtgutaustrag, differenziert nach Siebschnitten ...	126
Tabelle 4-23: Produktqualitäten des Leichtgutaustrages im Vergleich zu den Anforderungen bei der energetischen Verwertung (Krüger et al., 2016)...	127
Tabelle 4-24: Qualitäten des Leichtgutaustrages im Vergleich zu den zulässigen Werten der RAL-GZ 724.....	129
Tabelle 4-25: Schwermetallgehalte der Anhaftungen des Leichtgutaustrages	131
Tabelle 4-26: Produktqualitäten des Leichtgutaustrages (ungewaschen/ gewaschen).....	132
Tabelle 4-27: Ablagerungskriterien der Bodenfraktion nach DepV (Auszug).....	136
Tabelle 4-28: Biologische Aktivität der Bodenfraktion	137
Tabelle 4-29: Schwermetallgehalte der Bodenfraktion.....	138

Tabelle 4-30: Verbrennungstechnische Eigenschaften der Bodenfraktion < 10 mm (Krüger et al., 2016).....	138
Tabelle 4-31: Qualität des Prozesswassers entsprechend der AbwV, Anhang 27	143
Tabelle 4-32: Schwermetallgehalte der Prozesswasserfeststoffe	145
Tabelle 5-1: Ermittelte stündliche Massenströme für die einzelnen Feststofffraktionen aus der nassmechanischen Aufbereitung bei einem Gesamtdurchsatz von 50 Mg/h, bezogen auf das Aufgabegut gemäß Abbildung 5-1.....	151
Tabelle 5-2: Spezifikationen der zu Grunde gelegten Verfahrenstechnik inkl. Verbrauchsdaten	152
Tabelle 5-3: Kapitalkosten der nassmechanischen Aufbereitung der Feinfraktion < 60 mm	153
Tabelle 5-4: Variable Kosten der nassmechanischen Aufbereitung der Feinfraktion < 60 mm.....	153
Tabelle 5-5: Spezifische Betriebskosten.....	154
Tabelle 5-6: Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Aufbereitungsszenarien	157
Tabelle 5-7: Umweltbelastungen der Aufbereitungsanlage.....	158
Tabelle 5-8: Umweltbelastungen während der Betriebsphase	158
Tabelle 5-9: Umweltauswirkungen durch die Beseitigung der Reststoffe	159
Tabelle 5-10: Umweltauswirkungen durch die Verwertung des Leichtgutaustrages.....	159
Tabelle 5-11: Umweltauswirkungen durch die Verwertung des Schwer- und Feingutaustrages sowie des Glases	160
Tabelle 5-12: Gesamtbilanz der Umweltauswirkungen	160

Abkürzungsverzeichnis

AbwV	Abwasserverordnung
Äq	Äquivalent
ARGE KWBT	Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger
AT ₄	Atmungsaktivität über 4 Tage
PCB	Polychlorierte Biphenyle
BimSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
BioAbfV	Bioabfallverordnung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BSB ₅	Biologischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen
BW	Brauchwasser
C	Anteil vollständig (crushed) und teilweise gebrochener Körner
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
d	unterer Korndurchmesser
D	oberer Korndurchmesser
DepV	Deponieverordnung
DK	Deponieklasse
DNA	Desoxyribonukleinsäure
DOC	gelöster organischer Kohlenstoff (Dissolved Organic Carbon)
E	Exponent
EBS	Ersatzbrennstoff
EBV	Ersatzbaustoffverordnung
E _{CS}	Fließkoeffizient
EOX	Extrahierbare organisch gebundene Halogene
F	Widerstand gegen Frostbeanspruchung
FE-Metall	Eisenmetall
FGSV	Forschungsgesellschaft für Verkehr und Straßenwesen
FS	Frischsubstanz
FW	Frischwasser
G	Korngrößenverteilung (grading)
GB ₂₁	Gasbildung über 21 Tage
GV	Glühverlust

Abkürzungsverzeichnis

Ho	Brennwert
Hu	Heizwert
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KrW- / AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
Kx	Probenmaterial aus dem Schurf x
LA	Los-Angeles Wert
LAGA	Bund/ Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
M	Masse
MVA	Müllverbrennungsanlage
n	Anzahl
NE-Metall	Nichteisenmetall
NIR	Nahinfrarot
OS	Original-/ Frischsubstanz
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
RAL-GZ 724	Gütezeichen für Sekundärbrennstoffe
RC	Recyclingmaterial
Reku-Schicht	Rekultivierungsschicht
SBS®	Sekundärbrennstoff mit definierter Qualität nach RAL-GZ 724
SI	Kornformkennzahl (shape index)
SoB	Schichten ohne Bindemittel
StB	Straßenbau
SZ	Schlagzertrümmerungswert
TASI	Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen
TL	Technische Lieferbedingungen
TOC	Gesamtkohlenstoffgehalt (Total Organic Carbon)
TP	Technische Prüfvorschriften
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
TS	Trockensubstanz
u. BG	Messwerte liegen unterhalb der Bestimmungsgrenze
V	Volumen
Wcm	Wasseraufnahme

Abkürzungsverzeichnis

Z	Zuordnungswert zur Kategorisierung der Einbauklassen nach LAGA
ZTV	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen

Indizes

angeben	der gemessene Wert muss angegeben werden
C	grobe Gesteinskörnung
F	feine Gesteinskörnung
Ges.	Gesamt
NR	keine Anforderung (no requirement)
X	steht für die Grenzwerte die einzuhalten sind
x/y	x = M.- % Durchgang durch das obere Sieb (D) und y = M.- % Durchgang durch das untere Sieb (d)

Einheiten

°	Grad
cm ³	Kubikzentimeter
g	Gramm
h	Stunde
J	Joule
l	Liter
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
min	Minute
NI	Normliter
s	Sekunde
S	Siemens
t	Tonne
V	Volt
W	Watt
Vol.-%	Volumenprozent

Abkürzungsverzeichnis

SI-Präfixe

μ	Mikro
K	Kilo
M	Mega
m	Milli
P	Peta

1 Einleitung und Zielstellung

Der Rückbau von Deponien erfolgte bisher vorrangig aus umweltrelevanten Aspekten, vor dem Hintergrund der Verlängerung der Nutzungsdauer bestehender Deponieflächen oder mit dem Ziel die Deponiefläche einer höherwertigeren Nutzung zuzuführen. Mit der Verknappung von Primärrohstoffen gewinnt die Deponie zunehmend auch als anthropogene Lagerstätte an Bedeutung und damit auch der Deponierückbau unter dem Aspekt der Wertstoffgewinnung.

Die technische Machbarkeit von Deponierückbaumaßnahmen ist unter dem Gesichtspunkt der Erzeugung verwertbarer Stoffströme von der Quantität und Qualität der im Deponiekörper enthaltenen Stoffe abhängig. Detaillierte Angaben zu geeigneten Aufbereitungsverfahren sowie erzeugbaren Stoffströmen und Produktqualitäten stehen jedoch nicht in ausreichender und belastbarer Form zur Verfügung. Dies gilt insbesondere für das Feinmaterial, bspw. < 60 mm, dass mit bis zu 70 % den größten Massenanteil bei klassischen Siedlungsabfalldeponien einnimmt. Bei bisherigen Rückbauprojekten wurde die Feinfraktion kaum berücksichtigt und in der Regel ohne weitere Aufbereitung einer erneuten Deponierung zugeführt. Aufgrund des hohen Massenanteiles kann die Aufbereitung der Feinfraktion im Rahmen von Deponierückbaumaßnahmen jedoch einen wichtigen Beitrag hinsichtlich der Wertstoffgewinnung oder auch der Schaffung von Deponievolumen leisten. Die Feinfraktion stellt infolge ihrer inhomogenen stofflichen und geometrischen Eigenschaften ein trennschwieriges Gemisch dar, dass für die Aufbereitung mit konventionellen trocken-mechanischen Sortiervverfahren weniger geeignet erscheint. Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb gezielt der Ansatz der nassmechanischen Aufbereitung der Feinfraktion mittels Setzbetttechnik untersucht. Das Verfahrensprinzip der Setzbetttechnik beruht auf einem Sortiervorgang der Feinfraktion nach der Dichte, so dass neben den inerten Stoffströmen verschiedener Stückgröße auch ein Leichtgutaustrag erzeugt werden kann. Der Einsatz nasser Aufbereitungsverfahren bietet zudem den Vorteil, dass die für Deponat typischen Oberflächenanhaftungen entfernt und damit die Qualität der Austragsgüter gesteigert werden kann.

Hier setzt die Arbeit an. Im Rahmen des BMBF- Forschungsvorhabens „r³- strategische Metalle- Verbundvorhaben „TÖNSLM- Entwicklung innovativer Verfahren zur Rückgewinnung ausgewählter Ressourcen aus Siedlungsabfall- und Schlackedeponien“ sollte eine Verfahrenstechnik für die Aufbereitung und Konfektionierung der Feinfraktion aus dem Rückbau einer Siedlungsabfalldeponie entwickelt werden. Besonders hohe Anforderungen wurden an die Qualität der für die Verwertung vorgesehenen Produktströme gestellt. Die Qualitätskriterien für die inerten Stoffströme basieren auf umweltrelevanten sowie bautechnischer Anforderungen hinsichtlich ihrer Eignung als Baustoff im Bereich Straßenbau. Die Bewertung des Leichtgutaustrages erfolgte unter dem Aspekt der energetischen Verwertung in Form von Ersatzbrenn-

stoff bzw. gütegesichertem Sekundärbrennstoff mit den entsprechenden ambitionierten Qualitätsanforderungen. Neben der Verfahrensentwicklung zur Aufbereitung und Konfektionierung von deponiebürtigem Feinmaterial sollten Daten für eine ökonomische und ökologische Beurteilung des Gesamtsystems „Deponierückbau“ generell und der Feingutbehandlung im Besonderen generiert werden.

Übergeordnetes Ziel war es, mit dem FuE-Vorhaben zur Feinmaterialaufbereitung und Verwertung einen wesentlichen Baustein für die Entwicklung eines Gesamtsystems zur Aufbereitung und Verwertung aller im Rahmen des Deponierückbaus anfallenden wesentlichen Stoffströme bereitzustellen.

2 Grundlagen

Mit Hilfe der in Kapitel 2 zusammengestellten Daten soll der FuE-Bedarf für die Behandlung und Verwertung der Feinmaterialien aus dem Deponierückbau konkretisiert werden. Dazu wird zunächst der Stand der Technik zum Deponierückbau dargestellt. Weiterhin wird herausgearbeitet, welche Technikkomponenten am besten für die Aufbereitung und Konfektionierung der Feinmaterialien geeignet sind und welche Entwicklungsarbeiten geleistet werden müssen. Neben technischen Fragestellungen werden Qualitätsanforderungen an die erzeugten Produktströme spezifiziert, welche als Zielvorgabe für die zu entwickelnde Aufbereitungs-, insbesondere Konfektionierungstechnik dienen.

2.1 Deponierückbau

2.1.1 Definition

Anthropogene Lagerstätten gewinnen aufgrund der Verknappung und der damit einhergehenden Verteuerung von Primärrohstoffen zunehmend an Bedeutung im Hinblick auf die Bereitstellung von Ressourcen. Die Nutzung anthropogen geschaffener Lagerstätten wird unter dem Oberbegriff „Urban Mining“ zusammengefasst. Eine Kategorisierung des Urban Mining kann dabei durch die Unterscheidung nach der Art der Lagerstätten und den zugehörigen spezifischen Wirtschaftssektoren erfolgen (Tabelle 2-1). Das Landfill Mining bzw. der Rückbau von Deponien mit dem Ziel der Rohstoffgewinnung, stellt einen Teilaspekt des Urban Mining dar (Mocker et al., 2009a).

Tabelle 2-1: Kategorisierung des Urban Mining nach Mocker et al. (2009a)

Urban Mining		
Abfallwirtschaft	Bergbau und Verhüttung	Bauwesen
<ul style="list-style-type: none"> • Rezente Abfälle • Deponien <ul style="list-style-type: none"> ○ Haus- und Gewerbeabfall ○ Schlacken und Schlämme ○ Bauschutt und Boden ○ Produktionsspezifische Abfälle 	<ul style="list-style-type: none"> • Halden <ul style="list-style-type: none"> ○ Bergbau ○ Verhüttung • Versatz 	<ul style="list-style-type: none"> • Gebäude und Infrastruktur • Leitungen und Installationen

Für den Begriff Deponierückbau gibt es in der Literatur keine einheitliche Definition. Brammer et al. (1997) definieren Deponierückbaumaßnahmen als Wiederaufnahme alter Abfallablagerungen sowie der erneuten Deponierung der Abfälle nach einer möglichen mechanischen, biologischen oder thermischen Behandlung. Zentrales Ziel des Deponierückbaus sind hier alle Maßnahmen, die zu einer Verlängerung der Nutzungsdauer der Deponie beitragen. Hierzu können auch Maßnahmen zum Umweltschutz im Sinne der Altlastensanierung gezählt werden.

In einer aktuelleren Definition aus dem Jahr 2012 (DWA, 2012) wird unter dem Deponierückbau, das Abgraben der auf einer Deponie abgelagerten Abfälle sowie deren Aufbereitung, soweit diese technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist, sowie die ordnungsgemäße Entsorgung der Reststoffe verstanden. Das alleinige Umlagern der Abfälle am selben Standort stellt keine Rückbaumaßnahme dar.

In der vorliegenden Arbeit werden Deponierückbaumaßnahmen unter dem Aspekt der Wertstoffgewinnung betrachtet. Das Abgraben und die Aufbereitung der auf einer Deponie abgelagerten Abfälle, mit dem vorrangigen Ziel der Wertstoffgewinnung, wird klassisch auch als Landfill Mining bezeichnet (Bockreis und Knapp, 2013; Gäth und Nispel, 2012; Buchert et al., 2013; Scheffold, 2011).

Jones et al. (2013) erweitern den Begriff Landfill Mining zu „Enhanced-Landfill Mining“, wobei hier der Rückbau von Deponien die umfassende Erschließung der unterschiedlichen, abgelagerten Abfallströme zu Wertstoffen und Energie mit Hilfe innovativer Technologien und unter stringenter Berücksichtigung sozialer und ökologischer Kriterien, beinhaltet. Zusätzlich betrachtet das „Enhanced-Landfill Mining“ die Deponie nicht als Endlagerstätte, sondern als Zwischenlager, in dem die Wertstoffe so lange lagern, wie eine nachhaltige Nutzung nicht möglich ist (Ulmans, 2011).

2.1.2 Ziele und Hemmnisse

Ziele des Deponierückbaus

In dem von der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) im Jahr 2012 veröffentlichtem Themenband (DWA, 2012) werden unterschiedliche Zielstellungen für Deponierückbaumaßnahmen genannt. Der Fokus liegt hier auf der Wertstoffgewinnung und entspricht somit dem Ansatz des Enhanced-Landfill-Mining nach Jones et al. (2013).

- Stoffliche und energetische Verwertung,
- Flächenrecycling,
- Gewinnung von Deponievolumen,
- Hindernisbeseitigung für Infrastrukturmaßnahmen,
- Flächenaufwertung und Flächenrenaturierung,
- Altlastensanierung,
- Kosteneinsparungen beim Deponieabschluss,
- Senkung der Nachsorgekosten.

Das Ziel einer Deponierückbaumaßnahme ergibt sich aus standortspezifischen Bedingungen. Neben der Wertstoffgewinnung werden vor allem Kostenersparnisse bei der Stilllegung und Nachsorge angegeben (Fricke et al., 2012; Mocker et al., 2009a; Wiemer et al., 2009). Besteht

Bedarf an Deponievolumen zur Sicherung der Entsorgungssicherheit, erfolgt der Rückbau vor dem Hintergrund des Volumengewinns. Geht von dem Deponiekörper eine Umweltgefährdung aus, besteht ein unmittelbarer Handlungsbedarf hinsichtlich der Senkung des Gefährdungspotenziales. Der vollständige Rückbau von Deponien mit dem Ziel des Flächenrecyclings ist besonders für Deponien im städtischen Bereich von Interesse.

Hemmnisse des Deponierückbaus

In der Literatur werden vor allem wirtschaftliche Aspekte, fehlende rechtliche Rahmenbedingungen, ökologische Auswirkungen sowie die Akzeptanz der Anlieger als Argumente gegen den Rückbau von Deponien angeführt. Vorbehalte gegenüber Deponierückbaumaßnahmen resultieren dabei vorrangig auf der fehlenden Datenverfügbarkeit. Erkenntnisse aus bisher durchgeführten Rückbaumaßnahmen zeigen, dass der Rückbau grundsätzlich machbar ist. Jedoch sind spezifische Angaben zum Beispiel zu geeigneten Aufbereitungstechniken, zur Quantität und Qualität der deponiespezifischen Produktströme sowie zu Emissionen und der Entsorgung von Reststoffen kaum vorhanden (Mocker et al., 2009a; Fricke et al., 2012; Gosten, 2009; Krook et al., 2012).

Hinsichtlich rechtlicher Rahmenbedingungen unterliegen Deponien in Deutschland bis zum Ende der Nachsorgephase dem Abfallrecht beziehungsweise nach Beendigung der Nachsorgephase als Altablagerung dem Bodenschutzrecht. Der Rückbau einer Deponie mit dem Ziel der Wertstoffgewinnung in der Stilllegungs- oder Nachsorgephase oder nach dem Ende der Nachsorgephase ist weder im Abfallrecht noch im Bodenschutzrecht ausdrücklich vorgesehen (Krüger et al., 2016).

Die Realisierung einer Deponierückbaumaßnahme ist auch entscheidend abhängig von der Akzeptanz der Anwohner gegenüber dem Vorhaben. Relevant sind Vorbehalte gegenüber Ab- luft- und Lärmemissionen sowie Verkehrsbelastungen während der Rückbauphase (Fricke et al., 2012; Mocker et al., 2009a). Grundsätzlich kann sich der Rückbau zumindest langfristig positiv auf die Akzeptanz in der Bevölkerung auswirken bspw. durch Erhöhung der objektiven und subjektiven Flächenwertigkeit im Umfeld der Deponie z.B. durch Beseitigung von Umweltgefahrungspotenzialen und Flächenrenaturierung der ursprünglichen Deponiefläche.

2.1.3 Status Quo

Der erste in der Fachliteratur beschriebene Deponierückbau erfolgte 1953 in Tel Aviv. Das Deponat wurde dabei einer einfachen mechanischen Aufbereitung mittels Trommelsieb und anschließenden manuellen Sortierung des Siebüberlaufes unterzogen. Das erzeugte Unterkorn wurde als Bodenverbesserer auf Obstplantagen eingesetzt (Gäth und Nispel, 2012; Münnich et al., 2015).

Weitere dokumentierte Deponierückbaumaßnahmen erfolgten erst wieder Ende der 1980er Jahre, vor allem in den USA. Gründe dafür stellten vor allem der Grundwasserschutz, das Beseitigen von Deponien für Bau- und Infrastrukturmaßnahmen aber auch die Gewinnung von Abfällen für den Einsatz als Brennstoff bei gleichzeitiger Schaffung von neuem Ablagerungsvolumen dar (Mocker et al., 2009a; Münnich et al., 2015; Gäth und Nispel, 2012).

In Osteuropa, Indien und China wurde in den achtziger Jahren verstärkt Deponierückbau mit dem Ziel der Wertstoffgewinnung betrieben, wobei vor allem die Metallrückgewinnung aus Deponien der Eisen- und Stahlindustrie in Vordergrund stand (Krug, 2008).

Die erste große Baumaßnahme an einer Deponie in Deutschland erfolgte in den Jahren 1986 - 1987 bei der Umlagerung der Deponie Wolfsburg-Fallersleben (Bollwien, 1994).

Im Jahr 1990 wurde mit der Deponie Donaupark in Wien die erste Umlagerung einer Deponie innerhalb eines Stadtgebietes durchgeführt. Voraussetzung für die Umlagerung war eine aktive Belüftung des Deponiekörpers, welche hierbei erstmals angewendet wurde (Spillmann et al., 1993).

Neben dem Gewinn von Deponievolumen wurde ab den 1990er Jahren auch in Deutschland die Deponien zunehmend als Rohstofflager betrachtet (Münnich et al., 2015). Die erste in Deutschland durchgeführte Deponierückbaumaßnahme zur Wertstoffgewinnung erfolgte in Form eines Demonstrationsprojektes an der Siedlungsabfalldeponie Burgdorf/Horrheim. Das Ziel des Projektes bestand neben der Wertstoffgewinnung in der Bewertung der technischen und ökonomischen Machbarkeit sowie der Beurteilung notwendiger Arbeitsschutzmaßnahmen (Göschl, 1995). Weitere Rückbaumaßnahmen, die im europäischen Raum durchgeführt wurden, erfolgten beispielsweise in Italien (Cossu et al., 1995), Österreich (Kreuzwieser und Dörrie, 2003) und den Niederlanden (van der Zee, D. J. et al., 2004).

Die Anzahl der bisher durchgeführten Rückbaumaßnahmen variiert in der Literatur stark, wobei bisher an insgesamt 57 bis 77 Standorten Altabfälle im größerem Umfang aufgenommen und aufbereitet wurden (Burlakovs et al., 2016; Mocker et al., 2009a). Die Hauptgründe für diese durchgeführten Deponierückbaumaßnahmen lagen dabei vorwiegend im Bereich des Grundwasserschutzes, gefolgt von der Schaffung neuen Deponievolumens zur Laufzeitver-

längerung und der Wertstoffgewinnung, von deponieinternen Baumaßnahmen, von alternativen Flächennutzungen des Deponiestandortes und von Maßnahmen zur Reduktion der Nachsorgekosten (Mocker et al., 2009a).

2.1.4 Ökonomische/ ökologische Vorteilhaftigkeit von Rückbaumaßnahmen

Eine ganzheitliche ökonomische und ökologische Betrachtung des Deponierückbaus lag zu Beginn des BMBF Forschungsvorhaben TÖNSLM zum Thema Deponierückbau nicht vor. Vielmehr beinhalten die Berichte und Veröffentlichungen zum Thema Deponierückbau Einzelaspekte ohne sie in einen Gesamtkontext einzubinden. Die Ergebnisse der im Rahmen des TÖNSLM Forschungsvorhabens durchgeführten ganzheitlichen ökonomischen und ökologischen Betrachtung von Deponierückbaumaßnahmen, wobei auch die Aufbereitung des Feinmaterials berücksichtigt wird, sind in dem „Leitfaden zum Enhanced Landfill Mining“ (Krüger et al., 2016) zusammengefasst.

2.1.5 Durchführung Deponierückbau

Die allgemeine Vorgehensweise beim Rückbau von Deponiekörpern ist in der nachfolgenden Tabelle 2-2 dargestellt. Die wesentlichen Planungsgrundlagen für den Rückbau von Deponien stellen sowohl die historische Erkundung als auch die Voruntersuchung des Deponats dar.

Die historische Erkundung erfolgt anhand von Dokumentationsunterlagen und sonstiger Aufzeichnungen und dient zum einen der Kontrolle, in wie weit eine Rückbaumaßnahme unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten realisierbar ist und zum anderen lassen sich aus den Erkenntnissen erste Sicherheitsmaßnahmen ableiten (Fricke et al., 2012; DWA, 2012; Wiemer et al., 2009; Rettenberger, 2012).

Durch die Entnahme von Materialproben, bspw. mittels Probebohrungen, können konkrete Informationen hinsichtlich der eingebauten Abfallarten und -schichtungen, der stofflichen Zusammensetzungen des Deponates, dem Abbau- beziehungsweise Verschmutzungsgrad der Wertstoffe, zu vorhandenen Monoablagerungsbereichen, mineralischen Zwischenabdeckungen oder gegebenenfalls enthaltenen Sonderabfällen gewonnen werden. Des Weiteren ergeben sich daraus konkrete Hinweise auf notwendige Maßnahmen hinsichtlich des Arbeits- und Emissionsschutzes (DWA, 2012; Krüger et al., 2016; Wiemer et al., 2009; Rettenberger, 2012).

Der Ausbau des Deponates kann in Form einer Schichten- oder Tiefengrabung erfolgen. Das rückgebaute Material wird entweder direkt oder nach einer Zwischenlagerung der weiteren Aufbereitung und Behandlung zur Wertstoffseparierung zugeführt. Nicht verwertbare Stoffströme müssen einer geordneten Deponierung zugeführt werden (Fricke et al., 2012; Krüger et al., 2016; DWA, 2012).

Tabelle 2-2: Rückbau von Deponien (Ministerium für Umwelt und Forsten, 1996), zitiert bei (DWA, 2002)

Vorbereitung und Planung
<ul style="list-style-type: none"> • Historische Erkundung (Durchsicht vorhandener Unterlagen, Befragung etc.) • Voruntersuchung (unter anderem Erkundung von Materialeigenschaften, Deponieaufbau, mögliche Gasaustritte, Sickerwassereinstau, Erkundung des Gefahrenpotenzials) • Festlegung von Emissionsminderungsmaßnahmen sowie von Maßnahmen des Arbeitsschutzes und der messtechnischen Überwachungen • Testgrabungen (Erprobung des Bauverfahrens, der Messtechnik, der Arbeitsschutzmaßnahmen und der vorgesehenen Maßnahmen zur Emissionsminderung unter Praxisbedingungen) • Immissionsprognosen (Staub- und Geruchsbelastung) • Festlegung des Bauablaufes • Definition der Randbedingungen (Bedingungen unter denen die Arbeiten erfolgen dürfen bzw. einzustellen sind) • Erstellung von Randbedingungen (Umfangreiche Grabarbeiten im Deponiekörper werden von den zuständigen Behörden überwacht und bedürfen in der Regel zumindest einer Genehmigung, größere Projekte sogar einer Planfeststellung mit Öffentlichkeitsbeteiligung. Daher muss der gesamte Prozess der Grabarbeiten plausibel geplant und dokumentiert sein)
Durchführung
<ul style="list-style-type: none"> • in-situ-Vorbelüftung des Deponiekörpers zur Geruchsstabilisierung und/ oder Trocknung vor der Abgrabung (bei organikhaltigen Abfällen) • Abgrabung des Deponiekörpers; gegebenenfalls dabei schon weitgehende Separierung verschiedener Abfallarten • Behandlung der aufkommenden Abfälle mittels mechanischer, biologischer und thermischer Verfahren bzw. entsprechender Kombinationen • Erneute Ablagerung der behandelten Abfälle in zugewiesene Deponien/ Deponieabschnitten

Behandlung der ausgebauten Abfälle

Die Aufbereitung des Deponats lässt sich allgemein in die Verfahrensstufen Vorkonditionierung und produktorientierte Stoffstromtrennung unterteilen (Krüger et al., 2016), wobei beispielsweise Metalle, Kunststoffe oder Glas sowie heizwertreiche Fraktionen aus dem Deponat abgetrennt werden.

Die Vorkonditionierung der abgelagerten Abfälle beinhaltet zunächst das Homogenisieren und Zerkleinern der Abfälle sowie das Auftrennen des Deponates in einzelne Materialströme. Die mechanische Vorbehandlung des Deponates ist mit den Aggregaten, wie sie auch in der Hausmüllaufbereitung eingesetzt werden, in mobiler oder stationärer Ausführung, möglich. Die Auswahl der einzusetzenden Aggregate richtet sich nach den Materialeigenschaften des zu behandelnden Deponats. Der Siebprozess beispielsweise wird insbesondere durch bandförmige und zähe Inhaltsstoffe, wie beispielsweise Folien und Tonbänder, oder auch sperrigen Komponenten gestört. Einen weiteren Einfluss auf die Siebgüte übt der Wassergehalt des Deponates aus, welcher deutlichen Schwankungen unterliegen kann (Krüger et al., 2016; Pretz und

Garth, 2012). Im Rahmen der Vorkonditionierung hat sich die Aufteilung des Deponates in mehrere Siebschnitte bewährt (Tabelle 2-3) (Bernhard et al., 2011; Hölzle, 2010b; Gäth und Nispel, 2012). Die Abtrennung der Feinfraktion dient dabei der Verbesserung der Sortiereigenschaften hinsichtlich der Aufbereitung des Grobgutes. Erfolgt keine Abtrennung der Feinfraktion sind eingeschränkte Wirkungsgrade für alle weiteren Trennprozesse zu erwarten (Pretz und Garth, 2012).

Tabelle 2-3: Trennschnitte bei verschiedenen Rückbauprojekten

Deponie	Reststoffe	Feingut	Grobgut
Burghof/ Deutschland ¹	< 20 mm	20 - 60 mm	> 60 mm
Jägerberg/ Deutschland ³	< 35 mm	35 - 80 mm	> 80 mm
Marquartstein/ Deutschland ¹	< 35 mm	35 - 80 mm	> 80 mm
Måsalycke/ Schweden ³	< 18 mm	18 - 50 mm	> 50 mm
Nonthaburi/ Thailand ³	< 25 mm	25 - 50 mm	> 50 mm
Pitztalgrund/ Deutschland ³	< 50 mm	50 - 70 mm	> 70 mm
Pohlsche Heide ²	< 10 mm	10 - 60 mm	> 60 mm
Rennerod/ Deutschland ¹	-	< 60 mm	> 60 mm
Scheffau/ Deutschland ³	< 40 mm	(0)/ 40 - 80 mm	> 80 mm
Schöneiche/ Deutschland ¹	< 20 mm	20 - 40 mm	> 40 mm

¹(Gäth und Nispel, 2012)

²(Krüger et al., 2016)

³(Hölzle, 2010b)

Untersuchungen deponiebürtiger Abfallproben haben ergeben, dass sich im Grobgut vor allem Kunststoffe ansammeln. Metalle, Holz, Papier sowie Steine treten gleichermaßen im Grobgut als auch im Feingut (Fraktion > 10 mm beziehungsweise < 80 mm gemäß Tabelle 2-3) auf. Insgesamt nimmt das Feingut in der Regel den größten Massenanteil innerhalb des Deponates ein. Der hohe Anteil kleiner Partikel ist dabei auf Zersetzungsprozesse sowie die früher übliche Deponietechnik zurückzuführen, wobei beispielsweise große Mengen an Bodenaushub oder Bauschutt zur täglichen Abdeckung der Frischabfälle verwendet wurden (Rettenberger et al., 2011; Friedmann und Zollner, 1995; DWA, 2012; Van Vossen und Prent, 2011; Wanka et al., 2016). Die Vorkonditionierung erfolgt im Wesentlichen gemäß der in der Abbildung 2-1 dargestellten Reihenfolge.

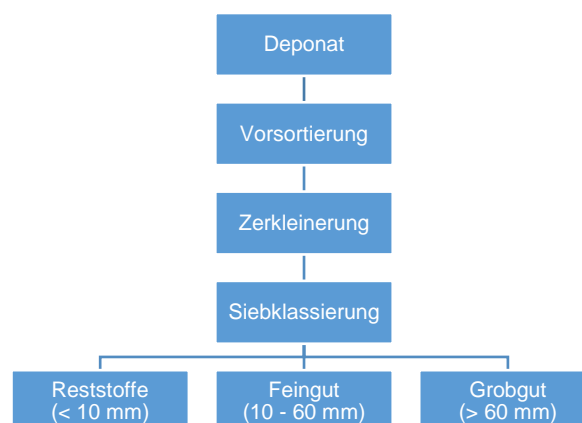


Abbildung 2-1: Vorkonditionierung, schematisch

Grobaufbereitung

Die produktorientierte Stoffstromtrennung des Grobgutes dient der Erzeugung verwertbarer Stoffströme. Der Umfang der Aufbereitung ist im Einzelfall zu ermitteln und richtet sich nach dem zu behandelnden Material und den abzutrennenden Wertstoffen. Für die Aufbereitung des Grobgutes kann hierzu die am Markt vorhandene Technik, welche auch zur Aufbereitung von Siedlungsabfall eingesetzt wird, verwendet werden. Die einzelnen Aggregate sind in Abhängigkeit der Materialeigenschaften, wie beispielsweise der Korngröße oder dem Wassergehalt, auszuwählen (DWA, 2012). Der schematische Ablauf der Grobaufbereitung ist beispielhaft in der Abbildung 2-2 dargestellt.

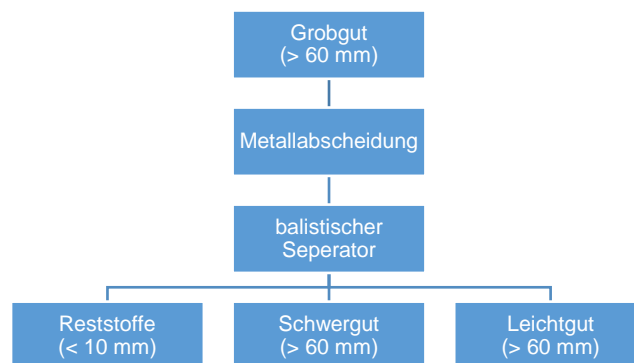


Abbildung 2-2: Produktorientierte Stoffstromtrennung, schematisch

Untersuchungen zur Aufbereitung der Grobfraction aus Deponaten ergaben, dass sich das Schwergut überwiegend aus dreidimensionalen Partikeln, bestehend aus Mineralien und Hartkunststoffen, zusammensetzt und keiner Verwertung zugeführt werden kann. Das Leichtgut setzt sich vorwiegend aus zweidimensionalen Partikeln, bestehend aus Kunststoffen, Textilien und Holz zusammen und ähnelt damit der heizwertreichen Fraktion aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung beziehungsweise Gemischen aus der getrennten Erfassung von Verpackungen. Soweit für die Fraktion der Reststoffe kein Verwertungsweg zur Verfügung steht, beispielsweise im Bereich Deponiebau, muss diese einer erneuten Deponierung zugeführt werden (Krüger et al., 2016; Gäth und Nispel, 2012; Bernhard et al., 2011).

Feinaufbereitung

Bei den bisher durchgeführten Rückbauprojekten wurde das im Rahmen der Vorkonditionierung erzeugte Feinmaterial in der Regel einer erneuten Deponierung zugeführt. Als Ursache dafür wird die schwierige stoffliche sowie energetische Verwertbarkeit dieser Fraktion genannt (DWA, 2012). Weiterhin stellt das Feingut einen Stoffstrom dar, welcher nur mit erhöhtem Aufwand zu sortieren ist (Rettenberger et al., 2011). Bisher erfolgte eine Aufbereitung der Feinfraktion nur in wenigen Fällen, wie z.B. bei dem Rückbau der Deponie Jägerberg bei Marquartstein im Jahr 2009. Hier wurde versucht die mineralische Fraktion < 35 mm abzutrennen und soweit aufzubereiten, dass ein Einsatz als Deponieersatzbaustoff möglich ist. Weiterhin

erfolgte eine Separierung der heizwertreichen Fraktion zur energetischen Verwertung (Hölzle, 2010b).

Insgesamt ist der Kenntnisstand hinsichtlich der Aufbereitung von Feinmaterial gering. Aufgrund des großen Massenanteiles der Feinfraktion, welcher bei einem Siebschnitt von < 60 mm im Rahmen von zahlriechen Rückbauprojekten zu etwa 60 bis 70 % ermittelt wurde, stellt die Feinaufbereitung jedoch einen wichtigen Aspekt im Rahmen von Deponierückbauprojekten dar (Rettenberger, 2012; Van Vossen und Prent, 2011). Zum einen können durch die Aufbereitung der Feinfraktion zusätzlich Wertstoffe verfügbar gemacht werden, zum anderen führt die Aufbereitung der Feinfraktion zu einer Reduzierung der erneut zu deponierender Sortierreste (Rettenberger et al., 2011).

2.2 Deponiebürtige Wertstoffe

2.2.1 Rohstoffsituation

In der Vergangenheit bezogen sich die Diskussionen über die Rohstoffknappheit vor allem auf fossile Energieträger. Die prognostizierten statischen Reichweiten, siehe auch (Andruleit et al., 2012), von Erdöl, Erdgas und Kohle, bezogen auf konventionelle und nicht konventionelle Vorkommen, werden in der Tabelle 2-4 dargestellt. Vor dem Hintergrund, dass Deutschland vor allem auf Erdöl und Erdgas als Primärenergieträger setzt (AGEB, 2016), wobei der Importanteil von Mineralöl im Jahr 2012 bei 97 % lag (SZ, 2016) und ein Einsatz von Kohle aus klimapolitischen Gründen nicht gewollt ist, muss mittel bis langfristig mit steigenden Rohstoffpreisen gerechnet und nach alternativen Strategien zur Sicherung der Energieversorgung gesucht werden.

Tabelle 2-4: Statische Reichweiten ausgewählte Primärrohstoffe in Jahren (BWK, 2009)

	Reserven	Ressourcen
Erdöl	62 a	157 a
Erdgas	64 a	756 a
Stein/ Braunkohle	jeweils 200 a	jeweils > 1000 a

Vor allem durch das starke Wirtschaftswachstum in Asien werden neben den genannten Energierohstoffen zunehmend auch Metalle und mineralische Rohstoffe in die Diskussion zur Rohstoffknappheit mit einbezogen (Franke et al., 2011). Die Entwicklung neuer Technologien und leistungsfähiger Produkte erfordert zunehmend den Einsatz von Rohstoffen mit spezifischen Materialanforderungen. So wird neben dem Einsatz etablierter Rohstoffen wie beispielsweise Kupfer auch zunehmend auf Elemente wie „Seltene Erden“ zurückgegriffen und die Bandbreite der eingesetzten Rohstoffe vergrößert sich (Erdmann et al., 2011; Rommel und Kreibe, 2015).

Vor allem Metalle, die in der Elektronikindustrie oder im Maschinen- und Anlagenbau Anwendung finden, haben Reichweiten von weniger als 50 Jahren (Franke et al., 2011). So beträgt z. B. bei Kupfer die Reichweite ca. 31 Jahre und bei Zink sogar nur 17 Jahre (Ahlert et al., 2015; Statista, 2016a).

Zu den mineralischen Rohstoffen gehören neben den Erzen der Metalle und Halbmatalle auch Industriemineralien sowie Steine und Erden (Erdmann et al., 2011). Industriemineralien werden in einer Vielzahl von Anwendungen, zum Beispiel zur Herstellung von Glas, Keramik und Magneten oder in der Elektronikindustrie und Landwirtschaft eingesetzt (Statista, 2016b). Zu den kritischen Stoffen zählen beispielsweise die Seltenen Erden und Phosphat (Feil und Rüttinger, 2011).

Aufgrund ihrer Eigenschaften finden Seltene Erden vor allem im Hochtechnologiebereich, beispielsweise bei der Herstellung von Katalysatoren oder Hochleistungsmagneten, im Bereich der Elektronik oder als Leuchtmittel Anwendung. Seltene Erden sind von strategischer Bedeutung, da sie nicht substituierbar sind. Die wesentlichen Reserven für Seltene Erden befinden sich in China und Russland. Diese Marktdominanz birgt Risiken für die Verbraucherländer, indem eine künstliche Knappheit und hohe Preise erzeugt werden können (Feil und Rüttinger, 2011). Insgesamt steigt die Nachfrage nach seltenen Erden weiter an (EY, 2016), so dass eine Verschärfung der Situation hinsichtlich der Versorgungssicherheit zu erwarten ist.

Der für Lebewesen notwendige Nährstoff Phosphor, welcher ein Bauelement der DNA darstellt und damit nicht substituierbar ist, tritt ausschließlich in Phosphaten gebunden auf (Umweltbundesamt, 2015). Zwar werden die Reichweiten von Phosphat auf circa 370 Jahre geschätzt, jedoch liegen die weltweiten Phosphatreserven vorwiegend sedimentär gebunden und belastet mit Cadmium und Uran vor (IVA, 2016; Hermann und Schenk, 2009).

Mittel und langfristig ist mit steigenden Aufwendungen für Primärrohstoffe zu rechnen. In der Regel führt dies auch zu steigenden Erlösen für Sekundärrohstoffe, wie sie bspw. auch infolge von Deponierückbaumaßnahmen gewonnen werden können.

2.2.2 Verwertbare Stoffströme aus Deponien

Als Wertstoffe in Deponien aus Siedlungsabfällen, Abfälle aus privaten Haushalten und hausmüllähnlichen Abfällen aus Gewerbe und Industrie, werden in der Literatur vor allem heizwertreiche Fraktionen, Metalle und Seltene Erden sowie Mineralien betrachtet (Wiemer et al., 2009; Franke et al., 2011; Rettenberger, 2012; Friedmann und Zollner, 1995; Scheffold, 2011). Die einzelnen Stoffströme mit ihren Verwertungsoptionen sind in Tabelle 2-5 dargestellt.

Zu den Mineralien werden Abfälle in Form von Bauabfällen oder Straßenaufbruch zur stofflichen Verwertung gezählt.

Seltene Erden gelangen in Form von Elektronikschrott in den Abfall und konnten in geringen Konzentrationen in Deponien nachgewiesen werden (Rettenberger, 2012; DWA, 2012; Bockreis und Knapp, 2011). Geeignete Verfahren zur Separierung Seltener Erden befinden sich im Entwicklungsstadium, weshalb Seltene Erden nachfolgend nicht weiter betrachtet werden.

Die heizwertreiche Fraktion besteht aus hochkalorischen Abfallbestandteilen wie zum Beispiel Kunststoffen, Holz, Papier oder Textilien, die aufgrund ihres Energiegehaltes einer energetischen Verwertung zugeführt werden können.

Metalle können in Siedlungsabfalldeponien als einzelne Komponenten oder in Form von Verbundmaterialien vorliegen. In Industrieschlacken oder MVA-Schlacken liegen sie zumeist in oxidierter Form, als metallische Einschlüsse oder als Agglomerat verschiedener Legierungen vor (Franke et al., 2011).

Die Nutzung im Deponat enthaltener nativ organischer und biologisch abbaubarer Fraktionen zur Erzeugung von Biogas ist als Verwertungsweg zumindest theoretisch denkbar.

Einen weiteren Stoffstrom zur stofflichen Verwertung stellt das Glas dar, welches über Siedlungs- oder Gewerbeabfälle in Deponien gelangt.

Bei den Industriemineralien wird vor allem Phosphor diskutiert. Ein erhebliches Potenzial wird dabei auf Deponien erwartet, die der Entsorgung großer Mengen an Klärschlamm oder Klärschlammaschen dienen (Franke et al., 2011).

Tabelle 2-5: Verwertungswege deponiebürtiger Stoffströme (Hölzle, 2010b), verändert und ergänzt aus Krüger et al. (2016)

Stoffgruppe	Mögliche Verwertung
• Grobmineralik	• Recyclingbaustoff im Straßen- und Wegebau, Deponiebaumaßnahmen
• Feinmineralik	• Deponiebaumaßnahmen, Recyclingbaustoff
• Heizwertreiche Fraktion (Kunststoffe, Textilien, Papier, Gummi, Holz etc.)	• Energetische Verwertung
• Kunststoffe	• Stoffliche Verwertung
• Reifen	• Energetische Verwertung, v. a. in der Zementindustrie
• Metalle	• Stoffliche Verwertung
• Organik	• Stoffliche Verwertung und Biogasherstellung
• Glas	• Stoffliche Verwertung, Deponiebaumaßnahmen
• Phosphor	• Stoffliche Verwertung

2.2.3 Theoretisches Wertstoffpotenzial in Siedlungsabfalldeponien

Das in Siedlungsabfalldeponien tatsächlich enthaltene Wertstoffpotenzial lässt sich aufgrund der lückenhaften Datengrundlage nur grob abschätzen. In der Literatur wurden entsprechende Abschätzungen zur Ermittlung des Wertstoffpotenziales für Deponien in Deutschland u.a. von Mocker et al. (2009b) sowie Rettenberger (2009) durchgeführt.

Mocker et al. (2009b) bestimmen das Wertstoffpotenzial von Siedlungsabfalldeponien anhand von Ablagerungsmengen und mit Hilfe von Abfallstatistiken. Ab dem Jahr 1975 wurden demnach 2,5 Milliarden Tonnen Siedlungsabfall, Bauschutt und Gewerbeabfall deponiert. Vorwendedeponien der ehemaligen DDR sind hierbei nicht berücksichtigt. Die Mengenermittlung der enthaltenen Wertstoffe erfolgte über Abfallanalysen und Abfallstatistiken verschiedener Epochen. Die ermittelten Potenziale sind in der nachfolgenden Abbildung 2-3 dargestellt. Da Abfälle die vor 1975 abgelagert wurden in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt wurden, ist die Mengenangabe als untere Begrenzung zu verstehen.

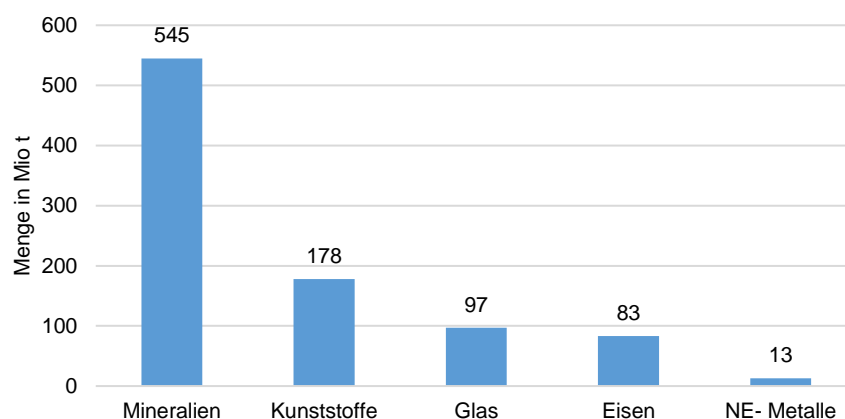


Abbildung 2-3: Geschätzte Mengen deponierter Wertstoffe (Mocker et al., 2009b)

Rettenberger (2009) betrachtet in seiner Abschätzung Hausmüll, hausmüllähnlichen Gewerbeabfall sowie Klärschlamm. Seit 1975 wurden demnach, ohne Berücksichtigung der Vorwendedeponien der ehemaligen DDR, etwa 750 Millionen Tonnen heizwertreiche Fraktion mit einem Heizwert von 8.000 PJ abgelagert. Dieser Energiegehalt reicht aus, um 58 % des jährlichen bundesdeutschen Primärenergiebedarfes abzudecken. Weiterhin sind in den Hausmülldeponien nach den Abschätzungen circa 26 Millionen Tonnen Eisen, 850.000 t Kupferschrott, 500.000 t Aluminiumschrott enthalten. Diese Mengen entsprechen für Kupfer 142 %, für Eisen 124 % und für Aluminium 54 % des bundesdeutschen Jahresbedarfes (Abbildung 2-4). Zusätzlich werden als Folge der Ablagerung von Klärschlamm etwa 650.000 t Phosphat in den Hausmülldeponien angenommen.

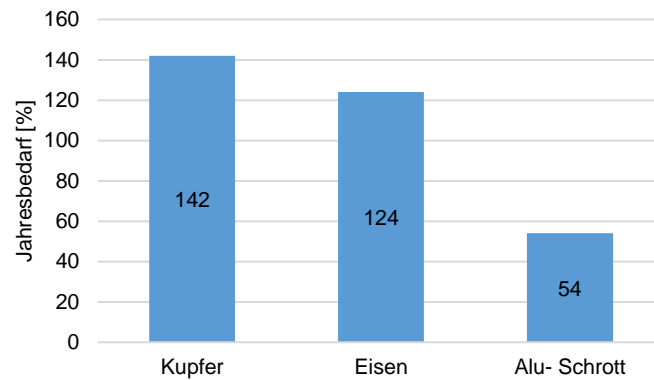


Abbildung 2-4: Ausgewählte Wertstoffpotenziale nach Rettenberger (2009)

2.3 Einflussfaktoren auf das Wertstoffpotenzial in Siedlungsabfalldeponien

Das Wertstoffpotenzial von Siedlungsabfalldeponien ist von mehreren vielfältigen Faktoren abhängig. Wesentliche Faktoren die das Inventar eines Deponiekörpers beeinflussen sollen nachfolgend kurz erläutert werden.

Bis zum Jahr 1972 erfolgte die Ablagerung von Abfällen ungeordnet und dezentral. Mit der Einführung des Abfallbeseitigungsgesetzes im Jahr 1972 erfolgte eine Kontrolle und Erfassung der Abfälle sowie die geordnete Ablagerung. Mit der Einführung des Abfallgesetzes im Jahr 1986 und der freiwilligen Selbstverpflichtung zur Getrenntsammlung von Papier/Pappe und Altglas sinkt der Anteil dieser Fraktionen im deponierten Siedlungsabfall. Ab dem Jahr 1995 vermindert sich weiterhin der Anteil mineralischer Bestandteile zur Ablagerung aufgrund der Selbstverpflichtung zur Reduzierung der Ablagerung verwertbarer Bauabfälle durch die Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (ARGE KWTB).

Die getrennte Erfassung von Bioabfällen und die Behandlung in Vergärungs- und Kompostanlagen nahm ab 1993 stetig zu, so dass der Anteil organischer Stoffe im Deponat immer geringer wurde (Kern, 2012). Ab dem Jahr 2005 ist gemäß Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV) die Deponierung von Bioabfällen aufgrund hoher Organikgehalte untersagt. Ab dem Jahr 2015 ist eine flächendeckende Getrenntsammlung durch § 11 Abs. 1 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG, 2016) vorgeschrieben.

Mit der Einführung der Verpackungsverordnung (VerpackV, 2013) im Jahr 1991 werden Leichtverpackungen, Metalle, Kunststoff und Verbundstoffe getrennt gesammelt, womit sich der Anteil dieser Wertstoffe im Siedlungsabfall deutlich reduziert.

Mit dem Erlass der Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV) im Jahr 2001 ist seit dem Jahr 2005 die Ablagerung von Klärschlamm auf Deponien aufgrund der hohen Organikgehalte nicht zulässig, womit das Phosphatpotenzial in den Deponiekörpern abnimmt.

Seit dem Jahr 2005 dürfen Restabfälle nur nach einer Vorbehandlung, welche die Entnahme werthaltiger Stoffe und biologische Stabilisierung beinhaltet, einer Deponierung zugeführt werden. Anforderungen an die Abfälle zur Ablagerung auf Deponien regelt die Deponieverordnung (DepV, 2016), welche die Abfallablagerungsverordnung im Jahr 2009 ersetzt.

Die aktuelle Rechtsgrundlage für das deutsche Abfallrecht bildet die fünfte Novelle des Abfallbeseitigungsgesetzes, das im Jahr 1996 verabschiedete Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/ AbfG), welches im Jahr 2012 novelliert und in Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG, 2016) umbenannt wurde. Das Ziel dieser Gesetzgebung ist die weitere Reduzierung anfallender Siedlungsabfälle zur Sicherung der Entsorgungssicherheit sowie die Förderung der Kreislaufwirtschaft. Maßnahmen zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen werden ebenso berücksichtigt wie die gemeinwohlverträgliche und dauerhafte Beseitigung nicht verwertbarer Abfälle im Inland. Rechtsverordnungen die im Rahmen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes entstanden sind, sind beispielsweise die Abfallverzeichnisverordnung (AVV, 2001), Batterieverordnung (BattV, 1998), Altfahrzeug-Verordnung (AltfahrzeugV, 2002), Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV, 2002), Altholzverordnung (AltholzV, 2002), Altölverordnung (AltölV, 2002) sowie die Klärschlammverordnung (AbfKlärV., 2006) und die Bioabfallverordnung (BioAbfV, 1998).

Im Allgemeinen nimmt mit der Einführung des KrW-/AbfG und der Verwertungspflicht von Abfällen ab dem Jahr 1994 der Wertstoffgehalt im zu deponierenden Restabfall zunehmend ab. In Abhängigkeit der Entwicklung der Verwertungstechnologien und -infrastrukturen ist nach Buchert et al. (2013) jedoch davon auszugehen, dass bis zur Jahrtausendwende Stoffe auf Deponien abgelagert wurden, die zum heutigen Zeitpunkt einer Verwertung zugeführt werden können. Deponien beziehungsweise Deponieabschnitte für Siedlungsabfall, die seit dem Jahr 2005 verfüllt wurden, spielen für die Wertstoffrückgewinnung keine Rolle. Eine Getrenntsammlung von Elektroschrott, der als Eintragsquelle für Seltene Erden angesehen werden kann, ist mit dem Elektroggesetz seit 2005 vorgeschrieben. Durch die zunehmende Produktion und dem vermehrten Einsatz von Seltenen Erden ab Mitte der 80er Jahre des 20. Jahrhunderts ist jedoch mit relativ geringen Gehalten Seltener Erden in Abfällen zu rechnen, die vor 1985 abgelagert wurden (Hölzle, 2010a; Feil und Rüttinger, 2011).

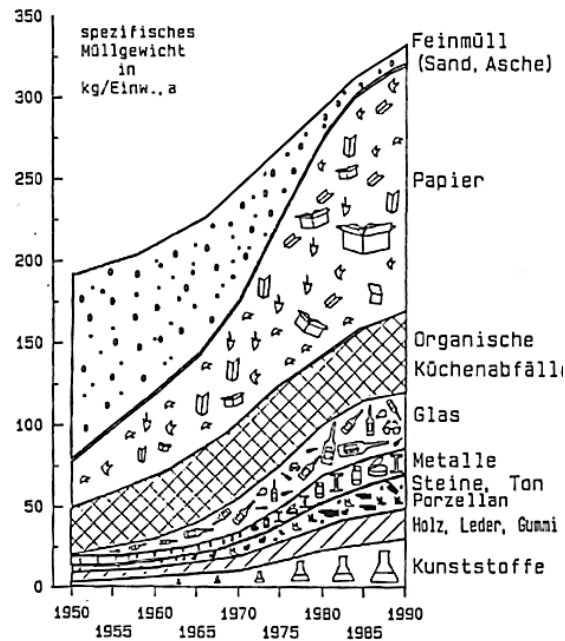


Abbildung 2-5: Hausmüllzusammensetzung in der BRD vor 1989 (Oschlies, 1989)

Zieht man die Entwicklung der Hausmüllzusammensetzung bis zu dem Jahr 1972, dem Zeitpunkt der Einführung des Abfallbeseitigungsgesetzes, zur Bewertung der Wertstoffgehalte älterer Deponien heran (Abbildung 2-5), ist anzunehmen, dass diese Deponien eher geringe Wertstoffgehalte aufweisen und für einen Rückbau mit dem Ziel der Wertstoffgewinnung, auch aufgrund der ungeordneten Ablagerung, ebenfalls weniger geeignet sind.

Deponien der ehemaligen DDR sind im Hinblick auf die Gewinnung von Wertstoffen getrennt zu betrachten. Hohe Wertstoffanteile sind hier aufgrund der staatlich geförderten Wertstoffsammlung von Glas, Papier, Schrott und Alttextilien, nicht zu erwarten. Auch der Anteil der heizwertreichen Fraktionen ist infolge des begrenzten Konsumangebotes in Verbindung mit weniger aufwendigen Verpackungen kaum von Relevanz. Insgesamt sind für die Abfälle der ehemaligen DDR, welche bis zum Jahr 1990 abgelagert wurden, durch einen hohen Feinanteil, beziehungsweise einen hohen Anteil mineralischer Bestandteile und Hausbrandaschen gekennzeichnet. Für eine Wertstoffgewinnung sind daher nur Deponiebereiche von Interesse, welche ab dem Jahr 1990 verfüllt wurden. Insbesondere die Ablagerungen aus den frühen 1990er Jahren weisen einen hohen Anteil an Sperrmüll auf (DWA, 2012; Rettenberger, 2012; Gosten, 2009; Bilitewski und Conrad, 1995; Bockreis und Knapp, 2013; Buchert et al., 2013).

2.3.1 Technische Gewinnbarkeit und Charakterisierung deponiebürtiger Wertstoffe

In wie weit die in den Deponien enthaltenen Wertstoffe tatsächlich wieder in den Wirtschaftskreislauf eingebracht werden können, ist abhängig davon, inwiefern diese technisch gewonnen werden können und welche Produktqualitäten diese besitzen. Insbesondere die lange Verweilzeit im Deponiekörper in Verbindung mit den dort vorherrschenden Milieubedingungen kann

zu einer Veränderung von Materialeigenschaften führen (Bockreis und Knapp, 2011; Schefold, 2011; Bockreis und Knapp, 2013). Bei Metallen beeinträchtigt der Grad der Oxidation die Produktqualität bzw. die Verwertbarkeit. Der Einbau bzw. die Verdichtung mit Kompaktoren führt außerdem zu einer intensiven Agglomeratbildung. Hierdurch kann die Wirkung der Aufbereitungs- und Trenntechnik eingeschränkt werden.

Für die Aufbereitung und Wiedergewinnung von Wertstoffen aus Abfällen stehen entsprechende Verfahren zur Verfügung (siehe auch Bilitewski und Härdtle, 2013). Für deponiebürtige Abfälle ergeben sich jedoch aufgrund der oben genannten Materialeigenschaften abweichende Anforderungen an die Aufbereitungstechnik gegenüber frischen Abfällen. Wiedergewinnungsraten und Reinheitsgrade deponiebürtiger Wertstoffe sind in der Tabelle 2-6 dargestellt.

Tabelle 2-6: Wiedergewinnungsraten und Reinheitsgrade deponiebürtiger Wertstoffe (Strange, 2010)

	Wiedergewinnungsraten	Reinheitsgrad
Boden	85 – 95 %	90 – 95 %
Eisenmetalle	70 – 90 %	80 – 95 %
Kunststoffe	50 – 75 %	70 – 90 %

Mineralik

Die Stoffgruppe der mineralischen Bestandteile setzt sich aus natürlich oder industriell hergestellten Gesteinskörnungen wie beispielsweise Kies, Sand, Beton, Ziegel, Keramik und Glas zusammen. Eine Separierung dieses Stoffstromes ist über Dichtentrennverfahren nach dem Stand der Technik möglich. Aufgrund der Oberflächenverschmutzung ist das Waschen des Stoffstromes vor der stofflichen Verwertung, zum Beispiel in Form von Ersatzbaustoff, notwendig (Wiemer et al., 2009; Friedmann und Zollner, 1995). Die höherwertige Verwertung des Stoffstromes, z.B. im Straßenbau, kann eine weitere Aufbereitung zur Entfernung von Störstoffen erfordern. Können die mineralischen Bestandteile weder aufbereitet noch einer Verwertung zugeführt werden, ist eine Wiederablagerung auf einer Inertdeponie vorzunehmen (Bockreis und Knapp, 2013).

Heizwertreiche Fraktion

Die Separierung heizwertreicher Komponenten, bspw. Kunststoffe, Holz, Textilien, erfolgt über dichte-basierte Aufbereitungsverfahren und entspricht dem Stand der Technik. Solange der Vorrang bzw. Gleichrang der energetischen Verwertung nicht innerhalb einer Rechtsordnung festgelegt ist wird gemäß § 8 Abs. 3 (KrWG, 2016) angenommen, dass die energetische Verwertung einer stofflichen Verwertung gemäß § 6 Absatz 1 (KrWG, 2016) gleichrangig ist, wenn der Heizwert des einzelnen Abfalls, ohne Vermischung mit anderen Stoffen, mindestens

11000 kJ/kg beträgt. Derzeit wird von der Bundesregierung bis zum 31. Dezember 2016 geprüft, ob und inwieweit der Heizwert zur effizienten und rechtssicheren Umsetzung der Abfallhierarchie des § 6 Absatz 1 (KrWG, 2016) noch erforderlich ist. Heizwertreiche Fraktionen aus Deponat weisen Verschmutzungen in Form von mineralischen Anhaftungen auf. Diese wirken sich sowohl auf den Aschegehalt und damit den Heizwert als auch auf den Schadstoffgehalt negativ aus (AFA, 1995; Krüger et al., 2016; DWA, 2012; Friedmann und Zollner, 1995; Zhou et al., 2014; Quaghebeur et al., 2013; Rotheut und Quicker, 2015). Vor allem Kunststoffe unterliegen aufgrund der Milieubedingungen innerhalb des Deponiekörpers einer Alterung und Neigen zur Versprödung, die auf die Verflüchtigung von Weichmachern zurückzuführen ist. Dies kann sich vor allem auf die Zerkleinerung beziehungsweise den Materialtransport im Heizkraftwerk negativ auswirken (Rotheut und Quicker, 2015).

Kunststoffe

Die Sortierung unterschiedlicher Kunststoffsorten aus Deponat zur stofflichen Verwertung ist technisch möglich, spielt jedoch bisher eine untergeordnete Rolle. Aufgrund der Verschmutzungen ist hier zunächst eine weitere Aufbereitung der Kunststoffe erforderlich. Die Materialvielfalt der Kunststoffe in Verbindung mit den darin enthaltenen Additiven erschwert die hochwertige stoffliche Verwertung erheblich. Weiterhin wird die Produktqualität aufgrund der Alterung und Geruchsbelastungen gemindert (Krüger et al., 2016).

Metalle

Das Abtrennen von Eisen und Nichteisenmetallen aus Abfallströmen entspricht dem Stand der Technik (Buchert et al., 2013; Wiemer et al., 2009). Metalle aus Deponat weisen Aufgrund der langen Verweildauer im Deponiekörper zumeist niedrige Qualitäten auf. Ursache sind hierbei vor allem Verschmutzungen infolge des Kontaktes mit Sickerwasser oder Gasen, aber auch Oxidationsprozesse. Weiterhin können Metalle als Materialverbund auftreten, beziehungsweise mit anderen Abfallbestandteilen verunreinigt sein.

Nativ organische Fraktion

Die nativ organische Fraktion umfasst vor allem biologisch abbaubare Bestandteile, die zur Erzeugung von Biogas eingesetzt werden können. Der Anteil dieser Fraktion im Deponiekörper hängt vom Alter der Deponie, der Ablagerungsmenge sowie von den Randbedingungen, die einen biologischen Abbau innerhalb des Deponiekörpers fördern oder hemmen und lokal stark variieren können, ab. Die nativ organische Fraktion tritt vor allem im Feinmaterial auf und kann gezielt abgesiebt werden. Bisher durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass Rückbaumaterial häufig nur noch eine geringe biologische Aktivität aufweist (DWA, 2012; Mönkare et al., 2016).

Glas

Glas unterliegt als inertes Material keinem Alterungs- oder Zersetzungsprozess innerhalb des Deponiekörpers. Die Separierung von Glas wird durch seine Kleinteiligkeit und die verschmutzten Oberflächen erschwert, was in der Vergangenheit zumeist zu einer Wiederablagerung zusammen mit den mineralischen Stoffströmen führte (Hölzle, 2010b; Bernhard et al., 2011). Eine sortenreine Separierung nach der Farbe, aber auch Art des Glases, zum Beispiel Labor-, Blei- oder Behälterglas, setzt eine Reinigung der Oberflächen voraus.

Phosphor

Die Gewinnung von Phosphor spielt im Bereich des Deponierückbaus für Haus- und Gewerbeabfalldeponien auf Grund zu geringer Konzentrationen keine Rolle. Höhere Aufkommen, die eine Rückgewinnung rechtfertigen können, werden hingegen in Klärschlammmonodeponien erwartet (Fricke et al., 2016b; Fricke et al., 2012; Buchert et al., 2013).

2.4 Verwertung und Beseitigung deponiebürtiger Stoffströme

In Bezug auf die Masse stellen die heizwertreichen und die mineralischen Fraktionen die größten Stoffströme zur Verwertung dar. In dem nachfolgenden Kapitel sollen dazu die möglichen Verwertungspfade und erforderlichen Qualitätskriterien spezifiziert werden. Die Qualitätsanforderungen für Metalle oder Glas werden aufgrund der geringeren Massenanteile im Deponat nicht betrachtet.

2.4.1 Voraussetzung für die Verwertung von Abfallstoffen

Gemäß § 5 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG, 2016) endet die Abfalleigenschaft eines Stoffes oder Gegenstandes, wenn der Stoffstrom ein Verwertungsverfahren durchlaufen hat und

- er für bestimmte Zwecke verwendet werden kann,
- ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,
- er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt,
- seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt führt.

Als Verwertungsverfahren ist gemäß § 3 KrWG jedes Verfahren definiert, das Abfälle einem sinnvollen Zweck zuführt, inklusive der Aufbereitung von Abfällen damit sie diesen Zweck erfüllen können. Werden diese Anforderungen erfüllt, können Abfallströme ihren Status als Abfall verlieren und als Sekundärprodukt einer höherwertigen Verwertung zugeführt werden. Kann das Ende der Abfalleigenschaft nicht erreicht werden erhalten die Abfallströme den Status als Abfall zur Verwertung oder Abfall zur Beseitigung.

2.4.2 Verwertung der heizwertreichen Fraktionen

Für den Einsatz heizwertreicher Fraktionen ergeben sich in der Praxis zwei Verwertungspfade, zum einen der Einsatz als Ersatzbrennstoff in Ersatzbrennstoff-Kraftwerken und zum anderen der Einsatz als Sekundärbrennstoff (SBS®). Der Pfad der Beseitigung der heizwertreichen Fraktion in Abfallverbrennungsanlagen wird in der Tabelle 2-7 der Vollständigkeit halber erwähnt.

Einsatz als Ersatzbrennstoff

Der Begriff Ersatzbrennstoff-Kraftwerk fasst Heizwerke und Heizkraftwerke zusammen, in denen Ersatzbrennstoffe aus Siedlungs- und Gewerbeabfällen verbrannt werden und die der Erzeugung von Strom, Dampf und/oder Fernwärme dienen. Energieabnehmer sind hier vor allem einzelne Anlagen und Werke, Industrie- und Gewerbeparks sowie öffentliche Energieversorger.

Da es sich bei Ersatzbrennstoff um einen Abfall zur Verwertung handelt, entstehen dem Erzeuger von Ersatzbrennstoff bei der Abgabe an das Kraftwerk aktuell Kosten zwischen 30 - 60 €/t, wobei die weitere Preisentwicklung vom Energiepreis und der Auslastung der Kraftwerke abhängig ist (Krüger et al., 2016). Im Jahr 2012 standen in Deutschland 36 Ersatzbrennstoff-Kraftwerke mit einer Gesamtkapazität von 6,3 Millionen Mg pro Jahr zur Verfügung, wobei die Kapazität der Ersatzbrennstoffe aus Siedlungs- und Gewerbeabfällen 4,8 Millionen Mg pro Jahr betrug (Thiel, 2013). Insgesamt wird die Auslastung von Anlagenbetreibern aktuell als gut bewertet, wobei gleichzeitig ein großes Interesse gegenüber neuen Stoffströmen besteht (Faulstich et al., 2015; Sarc et al., 2015).

Die Qualität der Ersatzbrennstoffe wird durch die Aufbereitungstiefe bestimmt, die wesentliche Brennstoffcharakterisierung erfolgt dann anhand chemischer, mechanischer, kalorischer sowie reaktionstechnischer Eigenschaften gemäß Anlage 8-1 (Beckmann und Horeni, 2002; Scheelhaase et al., 2008; Krüger et al., 2016; Sarc et al., 2015). Die niedrigsten Anforderungen an die Eigenschaften der Ersatzbrennstoffe stellen Müllverbrennungsanlagen bzw. Ersatzbrennstoffkraftwerke mit Rostfeuerung. Erfolgt die Verwertung in Anlagen mit erhöhten Anforderungen an die Förderfähigkeit, z.B. Wirbelschichtanlagen, ist eine weitere Aufbereitung der Ersatzbrennstoffe im Sinne einer Langteil- und Störstoffabscheidung, Zerkleinerung und Siebklassierung notwendig (Krüger et al., 2016; Scheelhaase et al., 2008; Thiel, 2013). Für die Schadstoffbelastung von Ersatzbrennstoffen gibt es bisher keine einheitlichen rechtsverbindlichen Grenzwerte (Scheelhaase et al., 2008; Thiel, 2013). Die Anforderungen an die Eigenschaften der Brennstoffe sind in der Regel anlagenspezifisch, wobei Schadstoffgehalte im Rahmen der Anlagengenehmigung festgelegt werden (Tabelle 2-7). Emissionsseitig gelten für Ersatzbrennstoffkraftwerke die Regelungen der 17. Bundesimmissionsschutzverordnung

(BlmSchV, 2013), welche zulässige Grenzwerte für Dioxine, Furane, Stickoxide und Schwermetalle im Abgasstrom formuliert.

Einsatz als Sekundärbrennstoff

Sekundärbrennstoffe sind gemäß Definition nach Gütesicherung (RAL-GZ 724, 2012) endkonfektionierte Brennstoffe mit definierten Qualitäten, die aus produktspezifischen Abfällen beziehungsweise aus den heizwertreichen Fraktionen von Siedlungsabfällen nach weitergehender Aufbereitung hergestellt werden. Sekundärbrennstoffe grenzen sich aufgrund einer höheren Aufbereitungstiefe von Ersatzbrennstoffen ab und stellen einen höherwertigen Stoffstrom in Form eines gütegesicherten Brennstoffes dar. Anwendung finden gütegesicherte Sekundärbrennstoffe vorwiegend in der Zement-, Kalk-, Papier- oder Stahlindustrie (Lechtenböhmer et al., 2006; Flamme, 2002; Scheelhaase et al., 2008; RAL-GZ 724, 2012). Den größten Abnehmer für Sekundärbrennstoffe stellt die Zementindustrie dar. Im Jahr 2014 wurden Primärenergieträger wie bspw. Kohle oder Heizöl zu über 63 % durch alternative Brennstoffe in Form von Altreifen, Kunststoffen aus der Gewerbeabfallaufbereitung oder heizwertreichen Fraktionen aus Siedlungsabfällen ersetzt (VDZ, 2015). Der Einsatz von Sekundärrohstoffen in Zementkraftwerken stellt aufgrund der vorherrschenden Verbrennungsbedingungen - höhere thermische Wirkungsgrade und geringere Verbrennungsrückstände - gegenüber Ersatzbrennstoffkraftwerken eine umweltverträgliche und schadlose Verwertung dar (Oerter, 2008). Im Bereich der Zementherstellung muss der Brennstoff eine homogene stoffliche Zusammensetzung aufweisen, da schwankende Verbrennungsbedingungen die Qualität des produzierten Klinkers negativ beeinträchtigen, ebenso wie zu hohe Schadstoffgehalte im Brennstoff in Form von Chlor oder Schwermetallen (Krüger et al., 2016; Flamme, 2002).

Die Gütesicherung nach RAL-GZ 724 ist eine freiwillige Vereinbarung zwischen Brennstoffherstellern und Abnehmern. Das Ziel der Gütesicherung ist die Bereitstellung eines Brennstoffs mit gleichbleibenden Eigenschaften. Berücksichtigt werden umweltrelevante Parameter wie zum Beispiel der Quecksilbergehalt, Parameter, die dem Schutz der Anlage dienen, wie beispielsweise der Chlorgehalt, und ökonomische Parameter wie Feuchtegehalte und Heizwerte. Brennstoffe, welche die Güte- und Prüfbestimmungen nach RAL-GZ 724 einhalten, können als Sekundärbrennstoffe definiert und durch die Markenbezeichnung SBS® geschützt werden. Hohe Anforderungen werden an die Förder- und Dosierbarkeit des Brennstoffes sowie an eine konstante Brennstoffqualität gestellt. Weiterhin erfordert der Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Zementwerken die Einhaltung von Mindestanforderungen hinsichtlich der chemischen und kalorischen Parameter (Krüger et al., 2016; Scheelhaase et al., 2008; Nolte und Keldenich, 2015).

Tabelle 2-7: Qualitätsanforderungen für Ersatzbrennstoffe aus frei verfügbaren Quellen
(Krüger et al., 2016), verändert

Parameter	Einheit	MVA	EBS-Kraftwerk		Zementkraftwerk	
		Rostfeuerung	Rostfeuerung	Wirbelschicht	Niederkalorik	Hochkalorik
Korngröße	mm	< 1000x1000x100 < 2500x2500x200 ⁸	< 300 ¹ , < 500x100x100	< 250	<25x25x1, < 300x300x20 ⁶	< 25x25x1
Schüttdichte	kg/m ³	keine Vorgaben	150 - 300 ¹	80 - 250 ² (200 - 600) ³	300 - 500	300
Gesamt- wasser	% OS	60	25 - 40	7 - 38 ² (10-30) ³	10 - 25	15
Aschegehalt bei 550 °C		30 ⁹	22 - 36	12 - 46 ² (11 - 43) ³	10 - 30	10
Chlor ge- samt		4	2,5	0,9 (1) ⁴	0,8	1
Schwefel- gesamt		3	1,7	0,7 (1,4) ⁴	0,5	1
Brennwert (Ho)	MJ/kg OS	-	-	-	-	-
Heizwert (Hu) ⁷		8 - 17	10 - 18	11 - 20 ² (8,5 - 15) ³	13 - 17	20 - 26
Heizwert (Hu)	MJ/kg TS	-	-	-	-	-
Antimon	mg/kg TS	2500	850	60 ⁴	150	120
Arsen		1000	30	13 ⁴	13	20
Blei		5000 ¹⁰	2800	400 ⁴	300	350
Cadmium		100	107	26,5 ² (10) ³	9	10
Chrom		4000	9200	8.088 ⁵ (900 ⁴ , 250) ³	185	200
Kobalt					12	20
Kupfer		15000	37100	850 ⁴	500	750
Mangan			850	350 ⁴	600	600
Nickel		2500	400	200 ⁴	100	100
Quecksilber		50	7	0,8	1,2	1,5
Thallium		1000	40	8	2	3
Vanadium		100	180	25 ⁴	25	25
Zinn		1000	400	90 ⁴	70	700
PAK		5000	-	-	-	-
PCB		50	-	-	-	-
Störstoffe	% OS	-	Fe-/ NE- Metalle < 0,5 ¹	Fe- Metalle < 1 NE- Metalle < 0,6 ³	-	-

¹ Angaben für Energies- Anlagen

² Angabe für stationäre Wirbelschicht

³ Angabe für rotierende Wirbelschicht

⁴ Angabe für zirkulierende Wirbelschicht

⁵ Summe Cr+Zn+Pb

⁶ Gilt für Anlagen mit Vorbrennkammer

⁷ Angaben für analysefeuchten Zustand

⁸ für Anlagen mit Vorzerkleinerer

⁹ Aschegehalt < 30 % möglich, unterliegen jedoch Sonderprüfung

¹⁰ Bei Überschreitungen eines Parameters muss die Summe aus Pb, Cu und Zn unterhalb von 45000mg/kg liegen

Gemäß Gütezeichen RAL-GZ 724 sind im Rahmen der Gütebestimmung die Parameter Feuchte, Heizwert, Aschegehalt, Chlor und Kupfer zu dokumentieren. Hinsichtlich der Schwer-

metalle sind die Anforderungen nach RAL-GZ 724, siehe Anlage 8-2, einzuhalten. Emissionsseitig gelten für die Verwertung von Sekundärbrennstoffen die Regelungen der 17. Bundesimmissionsschutzverordnung. Die Bandbreiten möglicher Anforderungen an den Brennstoff für unterschiedliche Beseitigungs-/ Verwertungswege sind in der Tabelle 2-7 aufgelistet.

2.4.3 Verwertung der mineralischen Stoffströme

Verwertungspfade

Möglichkeiten zur stofflichen Verwertung mineralischer Fraktionen aus Deponierückbau-maßnahmen werden in der Literatur im Bereich der Ersatzbaustoffe gesehen wozu unter anderem aufbereitete Bauschuttmassen in Form von Recyclingbaustoffen (RC-Baustoffen), industrielle Nebenprodukte oder Schlacken aus der Verbrennung fallen (Krüger et al., 2016; Flamme, 2002; Friedmann und Zollner, 1995; Gäth und Nispel, 2012; Bernhard et al., 2011; Onkelbach und Schulz, 2014).

Im Jahr 2012 wurde der Bedarf an Gesteinskörnungen für Baumaßnahmen überwiegend aus natürlichen Lagerstätten bereitgestellt. Der Anteil an Recyclingbaustoffe ist mit 12 % verhältnismäßig niedrig und bietet Optimierungspotenzial (Tabelle 2-8). Bei der Nutzung des gesamten zur Verfügung stehenden Potenziales ist eine Steigerung auf etwa 30 % möglich (Briese und Herden, 2014; Knappe, 2014)

Tabelle 2-8: Bedarf an Gesteinskörnungen in Deutschland (KrW- Bau, 2015)

Kiese und Sande	44,4 % (245,0 Mio. t)
Natursteine	38,2 % (211,0 Mio. t)
Recycling- Baustoffe	12,0 % (66,2 Mio. t)
Industrielle Nebenprodukte	5,4 % (29,5 Mio. t)
Summe	100 % (551,7 Mio. t)

Die Herstellung der RC-Baustoffen erfolgt überwiegend aus der Aufbereitung von Bauschutt und Straßenaufbruch, wobei hohe Recyclingquoten erreicht werden (Tabelle 2-9).

Tabelle 2-9: Recyclingbaustoff- Produktion in Deutschland (KrW- Bau, 2015)

Bauschutt	40,4 Mio. Mg (Recyclingquote = 78,3 %)
Straßenaufbruch	14,8 Mio. Mg (Recyclingquote = 96,1 %)
Boden und Steine	10,7 Mio. t
Baustellenabfälle	0,3 Mio. t
Summe	66,2 Mio. t

Der Einsatz von RC-Baustoffen (Tabelle 2-10) erfolgt überwiegend im Bereich von Straßen- und Erdbaumaßnahmen, im Bereich Asphalt und Betonbau als Zuschlagstoff sowie der sonstigen Verwertung, die vor allem Maßnahmen im Deponiebau betrifft (Schmidmeyer, 2014; Röth, 2015; Briese und Herden, 2014; Knappe, 2014).

Tabelle 2-10: Verwertungswege für Recyclingbaustoffe in Deutschland (KrW- Bau, 2015)

Verwertung im Straßenbau	51,7 % (12,6 Mio. t)
Verwertung im Erdbau	20,2 % (13,4 Mio. t)
Verwertung in der Asphalt-/ Betonherstellung	19,0 % (12,6 Mio. t)
Sonstige Verwertung	9,1 % (6,0 Mio. t)
Summe	100 % (66,2 Mio. t)

Eine Verwertung deponiebürtiger mineralischer Stoffströme im Bereich der Asphalt-/Betonherstellung kann ausgeschlossen werden, da hier ausschließlich sortenreine Gesteinskörnungen aus Straßenaufbruch oder Gleisschotter beziehungsweise Altbetone eingesetzt werden (Schmidmeyer, 2014).

RC-Baustoffe beziehungsweise Gemische, die sich aus unterschiedlichen Abfällen zusammensetzen, werden vorwiegend im Straßenunter- oder Erdbau, wie beispielsweise für Dammschüttungen, Wälle, Verfüllungen, Geländemodellierungen oder im Rahmen des Bodenaustausches, zur Verbesserung der Tragfähigkeit eingesetzt. Ein weiteres Einsatzgebiet stellt auch die Errichtung temporärer Baustraßen dar. Entsprechende Absatzmöglichkeiten stehen hier aufgrund ausreichender Nachfrage zur Verfügung. Ein Einsatz von RC-Baustoffen für höherwertiger Anwendungen, wie zum Beispiel in Frost- oder Schottertragschichten, findet bisher nur in begrenztem Umfang statt (Knappe, 2014; Schmidmeyer, 2014; Stoll, 2014).

Qualitätsanforderungen für den Einsatz mineralischer Stoffströme im Straßenbau

Der Einsatz von RC-Baustoffen erfolgt überwiegend im Bereich des Straßenbaus, die dafür geltenden umweltrelevanten und bautechnischen Anforderungen, welche in der TL-Gestein (Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau) der Forschungsgesellschaft für Verkehr und Straßenwesen (FGSV) festgelegt sind, sollen als Qualitätskriterium für deponiebürtige mineralische Stoffströme verwendet und nachfolgend vorgestellt werden. Die deponiebürtigen mineralischen Stoffströme werden hierbei als eine eigenständige Gesteinskörnung in Form eines Recyclingbaustoffes betrachtet.

Regulierung umweltrelevanter Anforderungen

Bezüglich der umweltrelevanten Anforderungen für Ersatzbaustoffe gibt es bisher keine bundeseinheitlichen Regelungen, so dass sich die meisten Bundesländer auf die Mitteilung M 20 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) - Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - (LAGA, 2012) beziehen. Landeseigene Regelungen, die sich ebenfalls an der **LAGA M 20** orientieren und den Umgang mit Ersatzbaustoffen, wie beispielsweise in Nordrhein Westfalen in Form von Erlassen regeln („Güteüberwachung von mineralischen Stoffen im Straßen- und Erdbau“, 2001), werden in dieser Arbeit nicht

berücksichtigt. In der LAGA M 20 wird der Begriff „Ersatzbaustoff“ explizit nicht definiert, sondern generell von mineralischen Abfällen gesprochen. Im Rahmen dieser Arbeit wird angenommen, dass es sich bei den mineralischen Stoffströmen aus dem Deponierückbau um einen Ersatzbaustoff in Form eines RC-Baustoffes handelt. Zwar ist eine konkrete Zuordnung deponiebürtiger mineralischer Stoffströme als Recyclingbaustoff nicht direkt möglich, da gemäß LAGA M 20, Teil II Nr. 1.4.1 für mineralische Stoffe aus dem Deponierückbau Einzelfallregelungen zu treffen sind, dennoch soll die Bezeichnung im Rahmen dieser Arbeit für mineralische Stoffströme aus dem Deponierückbau Anwendung finden. Als RC-Baustoffen wird nach LAGA M 20, Teil II Bauschutt verstanden, welcher in mobilen, beziehungsweise stationär betriebenen Anlagen für einen späteren Verwendungszweck ohne weitere Vermischung mit anderen Stoffen aufbereitet worden ist. Unter dem Begriff Bauschutt fallen nach LAGA M 20, Teil II mineralische Materialien, die bei dem Neubau oder Umbau, bei der Sanierung, Renovierung oder bei dem Abbruch von Gebäuden und anderen Bauwerken entstanden sind.

Mit der geplanten **Ersatzbaustoffverordnung** (ErsatzbaustoffV) als Teil der Mantelverordnung soll in Zukunft eine bundeseinheitliche Regelung hinsichtlich der Verwertung mineralischer Ersatzbaustoffe entstehen. Als mineralische Ersatzbaustoffe werden gemäß § 3 Nr. 8 ErsatzbaustoffV (3. Arbeitsentwurf der Mantelverordnung vom 23.07.2015) Baustoffe bezeichnet, die als Abfall oder bei Bautätigkeiten, in industriellen Herstellungsprozessen oder Aufbereitungsanlagen anfallen und für den Einbau in technischen Bauwerken geeignet sind. Hierzu zählen nach § 3 Nr. 17 bis Nr. 34 ErsatzbaustoffV (3. Arbeitsentwurf der Mantelverordnung vom 23.07.2015) wie auch nach LAGA M 20 Teil II beispielsweise Hochofenschlacken, Stahlwerksschlacken, Gießereirestsande, Hausmüllverbrennungsgaschen, Recyclingbaustoffe, aufbereitetes Baggergut, Gleisschotter oder Bodenmaterial. Gemäß Definition handelt es sich nach § 3 Nr. 30 Ersatzbaustoffverordnung (BMUB, 2015) bei Recyclingbaustoffen um durch Aufbereitung von Abfällen gewonnene Baustoffe, die bei Bautätigkeiten wie Rückbau, Abriss, Umbau, Ausbau, Neubau und Erhaltung von Hoch- und Tiefbauten, Straßen, Wegen, Flugplätzen und sonstigen Verkehrswegen angefallen sind und zuvor als natürliche oder künstliche mineralische Baustoffe in gebundener oder ungebundener Form im Hoch- und Tiefbau eingesetzt waren. In der geplanten Ersatzbaustoffverordnung (BMUB, 2015) wird zusätzlich das Abfallende für RC-Baustoffe hinsichtlich der umweltrelevanten Anforderungen gemäß § 19 mit dem Erreichen der Einbauklasse RC 1 explizit definiert. Werden die RC-Baustoffe den Einbauklassen ab RC 2 zugeordnet, handelt es sich ebenfalls um einen Recyclingbaustoff, jedoch mit dem Status als Abfall zur Verwertung. Regelungen bezüglich der Verwertung mineralischer Stoffströme aus dem Deponierückbau sind im Entwurf der Ersatzbaustoffverordnung vom 23.07.2015 bisher nicht enthalten.

In der **TL-Gestein-StB 04** (2007) sind in den Tabellen D1 und D2 die umweltrelevanten Anforderungen für verschiedene Ersatzbaustoffe beziehungsweise industriell hergestellte Gesteinskörnungen, basierend auf den Empfehlungen der LAGA M 20, aufgeführt. Bei natürlichen Gesteinskörnungen ist die Umweltverträglichkeit grundsätzlich gegeben, weshalb auf einen Nachweis verzichtet werden kann. Ein Einsatz der Ersatzbaustoffe aus umweltrelevanter Sicht ist möglich, wenn die im Rahmen der Güteüberwachung zu bestimmenden Richt- und Grenzwerte eingehalten werden. Obwohl die TL-Gestein eigene umweltrelevante Anforderungen auf Basis der LAGA M 20 definiert, sind gemäß TL-Gestein, Anhang D, die länderspezifischen Vorgaben einzuhalten (Handbuch Ersatzbaustoffe, 2014; Klein, 2010). Da sich die meisten Bundesländer sowie die TL-Gestein hinsichtlich umweltrelevanter Anforderungen von Ersatzbaustoffen an der Mitteilung M 20 der LAGA orientieren, soll dieses Regelwerk zur Bewertung der Umweltverträglichkeit mineralischer Stoffströme herangezogen werden.

Umweltrelevante Anforderungen nach LAGA M 20

Die LAGA M 20 ordnet jedem Abfall, in Abhängigkeit der enthaltenen Schadstoffe, entsprechende Zuordnungswerte beziehungsweise Einbauklassen zu und definiert entsprechende Einsatzgebiete. Der Einsatz von RC-Baustoffen ist in Abhängigkeit der Zuordnungswerte unter wasserundurchlässigen, durchlässigen oder teildurchlässigen Schichten, unter Beachtung des Mindestabstandes zum höchsten zu erwartenden Grundwasserstand, möglich (siehe Anlage 8-3). Die nach LAGA M 20 geltenden Zuordnungswerte für Bauschutt beziehungsweise RC-Baustoffe im Feststoff und Eluat sind in der nachfolgenden Tabelle 2-11 aufgelistet.

Tabelle 2-11: Zuordnungswerte für RC-Baustoffe und nicht aufbereiteten Bauschutt (LAGA, 2012)

	Parameter	Einheit	Grenzwerte nach LAGA M 20, Bauschutt (2003)			
			Z0	Z1.1	Z1.2	Z2
Feststoff	Kohlenwasserstoffe (C10 - C40)	mg/kg TS	100	300	500	1000
	EOX	mg/kg TS	1	3	5	10
	Summe PAK 16	mg/kg TS	1	5	15	75
	Summe 6 PCB	mg/kg TS	0,02	0,1	0,5	1
	Arsen	mg/kg TS	20	-	-	-
	Blei	mg/kg TS	100	-	-	-
	Cadmium	mg/kg TS	0,6	-	-	-
	Chrom Gesamt	mg/kg TS	50	-	-	-
	Kupfer	mg/kg TS	40	-	-	-
	Nickel	mg/kg TS	40	-	-	-
	Quecksilber	mg/kg TS	0,3	-	-	-
	Zink	mg/kg TS	120	-	-	-

	Parameter	Einheit	Grenzwerte nach LAGA M 20, Bauschutt (2003)			
			Z0	Z1.1	Z1.2	Z2
Eluat	pH- Wert	-	7 - 12,5	7 - 12,5	7 - 12,5	7 - 12,5
	el. Leitfähigkeit	µS/cm	500	1500	2500	3000
	Chlorid	mg/l	10	20	40	150
	Sulfat	mg/l	50	150	300	600
	Phenolindex	µg/l	< 10	10	50	100
	Arsen	µg/l	10	10	40	50
	Blei	µg/l	20	40	100	100
	Cadmium	µg/l	2	2	5	5
	Chrom gesamt	µg/l	15	30	75	100
	Kupfer	µg/l	50	50	150	200
	Nickel	µg/l	40	50	100	100
	Quecksilber	µg/l	0,2	0,2	1	2
	Zink	µg/l	100	100	300	400

Unterschiede hinsichtlich der Schadstoffgrenzwerte zwischen der LAGA M 20 und der TL-Gestein existieren lediglich für die organischen Schadstoffgehalte im Feststoff (Tabelle 2-12).

Tabelle 2-12: Abweichende Anforderungen zwischen LAGA M 20 und TL-Gestein

		Grenzwerte LAGA M 20 Bauschutt (2003)			TL Gestein- StB 04, Anhang D		
Parameter	Einheit	Z1.1	Z1.2	Z2	RC1	RC2	RC3
Kohlenwasserstoffe (C10 - C40)	mg/kg TS	300	500	1000	300 ¹	300 ¹	1000 ¹
Summe PAK 16	mg/kg TS	5	15	75	5	45	75
Summe 6 PCB	mg/kg TS	0,1	0,5	1	0,1 ²	0,5 ²	1 ²

¹ Die angegebenen Werte gelten nur für Kohlenstoff- Verbindungen von C10 - C22. Überschreitungen, die auf Asphalanteile zurückzuführen sind, stellen kein Ausschlusskriterium dar.

² Nachweisen nur bei spez. Verdacht

Regulierung bautechnische Anforderungen

Mit der TL-Gestein-StB 04 (2007) werden bautechnische Anforderungen an Gesteinskörnungen definiert, wobei die Einhaltung umweltrelevanter Anforderungen vorausgesetzt wird. Das Regelwerk wird im Allgemeinen von den Bundesländern als maßgeblich anerkannt, wobei länderspezifische Abweichungen möglich sind (Handbuch Ersatzbaustoffe, 2014; Klein, 2010).

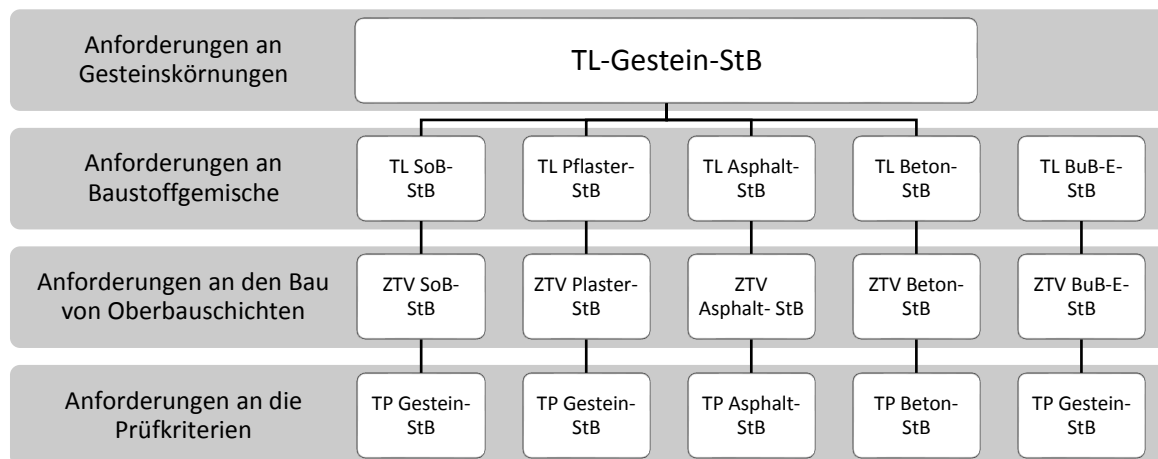


Abbildung 2-6: Regelwerke Gesteinskörnungen im Straßen- und Erbau (Klein, 2010)

Gemäß der Abbildung 2-6 nimmt die TL-Gestein eine übergeordnete Rolle ein. Sie spezifiziert bautechnische als auch umweltrelevante Anforderungen der einzelnen Gesteinskörnungen, kategorisiert diese hinsichtlich der Materialeigenschaften und ordnet Einsatzbereiche zu. Ausgehend von der TL-Gestein leiten sich für die einzelnen Verwendungsbereiche (zum Beispiel im Bereich „Schichten ohne Bindemittel“) Vorschriften in Form von „Technischen Lieferbedingungen“ (TL) ab, welche Anforderungen an Baustoffgemische definieren, aus denen diese Schichten hergestellt werden. Die Technischen Lieferbedingungen für Schichten ohne Bindemittel (TL SoB-StB) definieren somit Anforderungen an fertige Baustoffgemische zur Herstellung von bspw. Frostschutzschichten, Kies- und Schottertragschichten sowie Deckschichten.

Um Böden oder Baustoffe im Straßenbau speziell im Bereich Erbau einsetzen zu können, müssen die Anforderungen der technischen Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus (TL-BuB E-StB 09, 2009) eingehalten werden. Die erdbautechnischen Anforderungen beziehen sich dabei nur teilweise auf die TL-Gestein und stellen ein eigenständiges Regelwerk dar.

Der Hierarchie des Regelwerkes folgend finden weiterhin Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen (ZTV) sowie Technische Prüfvorschriften (TP) Anwendung. Die ZTV regeln dabei die Anforderungen an den Bau von Oberschichten, die TP definieren Anforderungen an die Prüfverfahren. Diese untergeordneten Regelwerke sollen im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden.

Bezüglich des Einsatzes von RC-Baustoffen kann zunächst eine Eingrenzung der Anwendungsgebiete erfolgen. Gemäß Handbuch Ersatzbaustoffe (2014) wird der Einsatz von Recyclingmaterial als Bettung oder Fugenmaterial im Bereich der Pflasteranwendung kritisch betrachtet und damit im Rahmen dieser Arbeit nicht diskutiert. Weiterhin ist der Einsatz von RC-Baustoffen, gemäß TL-Asphalt-StB 07/13 (2013), für Anwendungen im Bereich Asphalt nur mit

Ausnahme zugelassen. Nicht zulässig ist ebenso der Einsatz von Ersatzbaustoffen im Bereich der Betondeckschichten nach TL-Beton-StB 07 (2008). Die Hauptanwendungsgebiete für Recyclingbaustoffe im Straßenbau liegen damit im Bereich Straßenoberbau in Form von Schichten ohne Bindemittel (SoB) sowie im Erdbau (Handbuch Ersatzbaustoffe, 2014; Klein, 2010).

Bautechnische Anforderungen an Gesteinskörnungen aus Recyclingbaustoffe im Bereich Schichten ohne Bindemittel nach TL-Gestein

Die TL-Gestein definiert Anforderungen an natürliche, künstlich hergestellte und rezyklierte Gesteinskörnungen, welche z.B. bei der Herstellung von Oberbauschichten aus Asphalt, hydraulisch gebundenen beziehungsweise ungebundenen Baustoffgemischen, Beton oder Pflasterbelägen eingesetzt werden. Neben den umweltrelevanten Anforderungen werden allgemeine Anforderungen an die Gesteinskörnungen gestellt. Im Allgemeinen müssen die Gesteinskörnungen ausreichend verwitterungsbeständig sein und der Anteil von Bestandteilen, die quellen, zerfallen, sich lösen oder chemisch reagieren, darf eine schädliche Menge nicht überschreiten. Die Tabelle 2-13 zeigt die Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von Recyclingbaustoffe gemäß TL-Gestein, Tabelle B. 1, Anhang B.

Tabelle 2-13: Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von RC-Baustoffen

Stoffgruppe	%
Asphaltgranulat im Anteil > 4 mm	≤ 30
Klinker, Ziegel, Steinzeug im Anteil > 4 mm	≤ 30
Kalksandstein, Putze und ähnliche Stoffe im Anteil > 4 mm	≤ 5
mineralische Leicht- und Dämmstoffe, wie Poren- und Bimsbeton im Anteil > 4 mm	≤ 1
Fremdstoffe, wie Holz, Gummi, Kunststoffe und Textilien im Gemisch	≤ 0,2
Ausbauasphalt ¹	≤ 10

¹ gilt nur für den Einsatz von Recyclingbaustoffen im Erdbau

Neben der stofflichen Zusammensetzung regelt die TL-Gestein-StB Anforderungen hinsichtlich geometrischer und physikalischer Eigenschaften. Die Mindestanforderungen, welche Recyclingbaustoffe hinsichtlich des Einsatzes in Schichten ohne Bindemittel erfüllen müssen, sind dazu in der Tabelle 2-14 zusammengetragen, die einzelnen Eigenschaften werden in der Anlage 8-4 näher beschrieben.

Tabelle 2-14: Bautechnische Anforderungen an RC Material (TL-Gestein-StB 04, 2007), Anhang E

TL-Gestein- StB Abschnitts- Nr.	Eigenschaft	Frostschutz- schicht	Schotter-/Kiestrag- schicht	Deckschicht
2.1.1	stoffl. Kennzeichnung	ist anzugeben		
2.1.2	Rohdichte	ist anzugeben		
2.2.2	Korngrößenverteilung			
	Korngruppen/ Lieferkörnung	G _F 80; G _C 80/20 G _F 85; G _C 85/20		
	zusammengefasste Korngruppen	G _C 90/15 GT _C 20/15; GT _C 20/17,5		
	Toleranz für Korngrößenverteilung	GT _A NR		
2.2.3	Gehalt an Feinanteilen			
	Korngruppe/ Liefer- körnung 0/2 bis 0/5	f _{angegeben ¹⁾}		
	Korngruppe/ Liefer- körnung 2/4 bis 32/63	f ₄		f _{angegeben}
2.2.5	Kornform grober Gesteinskörnung	SI ₅₀ /FI ₅₀		
2.2.6	Anteil gebrochener Oberflächen	C _{NR}	C _{90/3} ²⁾	C _{NR}
2.2.9	Widerstand gegen Zertrümmerung	gesteinsbezogen gemäß Anhang A ³⁾	gesteinsbezogen gemäß Anhang A	
2.2.14.1	Wasseraufnahme	W _{CM} = 0,5		
2.2.14.2	Widerstand gegen Frostbeanspruchung	F ₄ ; F _{angegeben ⁴⁾}	F ₄ ; F _{angegeben ⁵⁾}	F ₄
2.4	umweltrelevante Merkmale	siehe Abschnitt 2.4 TL-Gestein und Anhang D		

1) Für Gießereirestsand (GRS) gilt f₁₆

2) Gilt nur für Schottertragschichten

3) siehe auch TL SoB- StB, Abschnitt 1.4.2

4) Gilt nur für Hausmüllverbrennungsasche (HVA) und RC-Baustoffe

5) Gilt nur für RC-Baustoffe

Bautechnische Anforderungen für Gesteinskörnungen aus Recyclingbaustoffen im Bereich Erdbau des Straßenbaus nach TL BuB E-StB 09

Die „Technischen Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus“ (TL BuB E-StB 09) definieren sowohl umweltrelevante als auch erdbautechnische Anforderungen an Böden und Baustoffe die zur Herstellung von Erdbauwerken im Straßenbau eingesetzt werden. Die Anforderungen an Recyclingbaustoffe für den Einsatz im Erdbau des Straßenbaus sollen nachfolgend vorgestellt werden.

Für den Einsatz von Recyclingbaustoffen im Erdbau gelten die gleichen Anforderungen hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung wie im Straßenbau gemäß TL-Gestein, Tabelle B1. Zusätzlich wird für Recyclingbaustoffe gefordert, dass der Anteil an Ausbauasphalt 10 % nicht übersteigt und keine mit pechhaltigen Bindemitteln gebundenen Stoffe vorliegen. Weiterhin ist

der Anteil der Körnungen < 4 mm aufzuführen. Recyclingbaustoffe sind nach TL BuB E-StB 09 zu beschreiben und zu benennen. Die rezyklierten Baustoffe werden in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung gemäß DIN 18196 in Bodengruppen eingeteilt und müssen einer Bodengruppe gemäß Tabelle 1 - Tabelle 3, TL BuB E-StB 09 entsprechen. Die Anforderungen an die Korngrößenverteilung grobkörniger und gemischtkörniger Böden nach TL BuB E-StB 09 sind im Anhang in der Anlage 8-5 und Anlage 8-6 dargestellt. Die Plastizität ist nach DIN 18122-1 (1976) zu bestimmen, der Wassergehalt gemäß DIN 18121-1 (1976). Der Wassergehalt hat dem für Einbau und Verdichtung erforderlichen Wassergehalt zu entsprechen, welcher in der Regel bei 97% der ermittelten Proctordichte liegt (TL-BuB E-StB 09, 2009; Handbuch Ersatzbaustoffe, 2014). Gemäß TL BuB E-StB 09 gelten für Recyclingbaustoffe im Erdbau die umweltrelevanten Anforderungen der TL-Gestein (TL-BuB E-StB 09, 2009).

Die Klassifizierung der Recyclingbaustoffe hinsichtlich ihrer bautechnischen Zwecke im Erdbau erfolgt, ebenso wie bei Primärbaustoffen und Böden, gemäß DIN 18196. Anhand der ermittelten Korngrößenverteilung (DIN 18123, 1996) und der Plastizität (DIN 18122-1, 1976) werden die Baustoffe in grob-, gemischt- und feinkörnige Böden eingeteilt und Bodengruppen mit ähnlichen bodenphysikalischen Eigenschaften wie beispielsweise Frostepfindlichkeit, Verdichtungsfähigkeit, Durchlässigkeit, Erosionsempfindlichkeit und Scherfestigkeit zugeordnet (DIN 18196, 2011; DIN 18196, 2011; Handbuch Ersatzbaustoffe, 2014)

In Abhängigkeit der erreichten Bodengruppe erfolgt gemäß Tabelle 4, DIN 18196 eine Bewertung der bautechnischen Eignung für die Anwendungen im Bereich:

- Baugrund für Gründungen;
- Baustoff für Erd- und Baustraßen;
- Baustoff für Straßen- und Bahndämme;
- Baustoff für Erdstaudämme (Dichtung, Stützkörper);
- Baustoff für Dränagen.

Marktsituation für Recyclingbaustoffe

Die Nachfrage nach Recyclingbaustoff erfolgt zumeist aus der gewerblichen und privaten Bauwirtschaft. Die öffentliche Hand als größter Bauherr steht dem Einsatz von Recyclingbaustoff bisher eher ablehnend gegenüber, obwohl die rechtlichen Grundlagen dafür gegeben sind (Knappe, 2014; Schmidmeyer, 2014; Röth, 2015; Onkelbach, 2015; Knappe, 2011).

Aufgrund dieser Situation konzentriert sich der Markt für Recyclingbaustoffe auf die Bereitstellung kostengünstiger Recyclingbaustoffe mit geringer bautechnischer Qualität für die Anwendung im gewerblichen und privaten Straßen-, Wege- und Verkehrsflächenbau und Erdbau, wobei nur Baustoffe mit hohen Umweltqualitäten entsprechend der Einbauklassen RC 1 (nach

TL-Gestein) beziehungsweise Z1.1 (nach LAGA M 20) zum Einsatz kommen. Für höher belastete Recyclingbaustoffe, welche den Einbauklassen RC 2 entsprechen, fehlen die Absatzwege, so dass diese im Allgemeinen im Bereich Deponiebau eingesetzt oder auf Deponien beseitigt werden müssen (Schmidmeyer, 2014).

Unter der sonstigen Verwertung ist vor allem der Einsatz von Recyclingmaterial im Deponiebau, zur Errichtung von Wegen, Lagerflächen oder Funktionsschichten zu verstehen. Bautechnische sowie umweltrelevante Anforderungen werden durch die Deponieverordnung geregelt. Bei diesem Einsatz kommt vorwiegend Recyclingbaustoff mit dem Status Abfall zur Verwertung zum Einsatz. Die Nachfrage nach Recyclingmaterial für den Deponiebau ist lokal sehr verschieden und abhängig von notwendigen Baumaßnahmen auf der jeweiligen Deponie (Schmidmeyer, 2014).

Die öffentliche Hand kann in ihrer Rolle als größter Bauherr im Bereich des Straßen- und Wegebbaus einen positiven Einfluss auf die Verwertung sowie die Akzeptanz gegenüber Recyclingbaustoffen ausüben und den Gedanken der Kreislaufwirtschaft vorantreiben. Gefördert werden kann der Einsatz von Recyclingbaustoff beispielsweise durch eine Gleichbehandlung natürlicher beziehungsweise recycelter Baustoffe im Rahmen der öffentlichen Ausschreibung. Die Ausrichtung des Marktes auf kostengünstige Recyclingbaustoffe mit geringen bautechnischen Qualitäten hemmt den Einsatz hinsichtlich höherwertiger Anwendungsfälle. Eine Steigerung der Qualität der Recyclingbaustoffe beispielsweise durch selektiven Rückbau oder sortenreine Aufbereitung von Abfällen in Verbindung mit Qualitätssicherungsmaßnahmen kann dieser Entwicklung entgegenwirken (Schmidmeyer, 2014; Röth, 2015; Arenz, 2015).

2.4.4 Kunststoffrecycling

Unabhängig von der Wirtschaftlichkeit erscheint der Einsatz von Regranulaten aus Kunststoffen für Einsatzbereiche mit geringen Ansprüchen möglich (Scheffold, 2011; Krüger et al., 2016; Scheelhaase et al., 2008; Wiemer et al., 2009; Hölzle, 2010b; Bernhard et al., 2011; Quaghebeur et al., 2013; Friedmann und Zollner, 1995).

2.4.5 Metallrecycling

Um die im Deponat enthaltenen Eisen- und Nichteisenmetalle einer höherwertigeren Verwertung z.B. durch den Einsatz von Eisenmetallen in der Stahlherstellung oder Metallverhüttung zuzuführen und Erlöse zu erzielen, ist eine weitere Aufbereitung der Metallfraktion notwendig (Krüger et al., 2016; Hölzle, 2010b; Gosten, 2009; DWA, 2012; Kosub, 2015; Deike et al., 2013). Hinsichtlich der Stahlproduktion stellen bspw. NE-Metalle einen Störstoff dar, welche zu Qualitätseinbußen in der Neustahlproduktion führt, so dass für höherwertige Anwendungen sortenreine Stoffströme erzeugt werden müssen (Martens, 2011).

2.4.6 Glasrecycling

Anforderungen hinsichtlich der Beschaffenheit von Glas zur Wiederverwertung hat der Fachverband Glasrecycling des Bundesverbandes für Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V. (BVSE) zusammen mit der Glasindustrie und dem Arbeitskreis Glas des Bundesverbandes der Deutschen Entsorgungs-, Wasser-, und Rohstoffwirtschaft e.V. (BDE) in den Leitlinien „Qualitätsanforderungen an Glasscherben zum Einsatz in der Behälterglasindustrie“ formuliert (BVSE, 2013). Die spezifischen Anforderungen an die Scherben werden zwischen dem Lieferanten und dem Kunden vereinbart. In den Produktspezifikationen für „Sammelware Hohlglas“ ist weiterhin vereinbart, dass hygienisch bedenkliche Abfälle sowie Glasbeimengungen und Verunreinigungen, die nicht aus der typischen Haushaltserfassung der dualen Systeme stammen, grundsätzlich zu einer Annahmeverweigerung durch den Glasaufbereiter führen. Eine hochwertige stoffliche Verwertung von Glasfraktionen aus dem Deponierückbau im Bereich der Behälterglasherstellung ist damit fraglich. Andere Verwertungsoptionen ergeben sich aber beispielsweise aus der stofflichen Nutzung von Glas im Bereich Straßenbau als Glasschaumschotter (Meyer und Emersleben, 2010) oder in Form von Schaumglas als Wärmedämmmaterial (Scheelhaase et al., 2008).

2.4.7 Verwertung nativ organischer Fraktionen

Komposte aus dem Deponierückbau sind in der BioAbV (2012) zwar nicht benannt, aber wegen seines Ursprungs mit Kompost aus einem Gesamtmüll gleichzusetzen und somit von einer landbaulichen Verwertung auszuschließen. Forschungsvorhaben im internationalen Bereich hingegen empfehlen den Einsatz der bodenähnlichen Feinfraktion aus Deponierückbaumaßnahmen als Kompost beziehungsweise für die Herstellung temporärer Oberflächenabdeckungen (Prechthai et al., 2008; Masi et al., 2014).

2.4.8 Wiederablagerung von Reststoffen

Die Deponieverordnung definiert mit § 6 die Anforderungen hinsichtlich der Ablagerung von Abfällen auf Deponien beziehungsweise einzelnen Deponieabschnitten. Die Zuordnung der abzulagernden Abfallströme zu der Deponieklasse zur Ablagerung erfolgt nach den Zuordnungskriterien gemäß Anhang 3 Abs. 2 DepV. Zusätzlich erlaubt § 6 Abs. 6 DepV, dass Abfälle mit Zustimmung der zuständigen Behörde auch bei Überschreitung einzelner Zuordnungswerte wie beispielsweise dem Gesamtkohlenstoffgehalt (TOC) oder Glühverlust (GV) abgelagert werden, sofern zuvor eine möglichst weitgehende Aussortierung organischer Anteile erfolgt ist und dass Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird. Gleiches gilt gemäß § 6 Abs. 6 Satz 4 DepV auch für Abfälle, die aus dem Deponierückbau oder einer Altlast stammen, insofern die heizwertreichen Abfallanteile vor der Ablagerung weitestgehend abgetrennt wurden.

2.5 Aufbereitung der Feinfraktion

Für die Aufbereitung der Feinfraktion stehen Erkenntnisse nur im begrenztem Umfang zur Verfügung, da das Feinmaterial bei bisherigen Rückbaumaßnahmen in der Regel ohne Aufbereitung einer erneuten Deponierung zugeführt wurde (siehe 2.1.5). Da die Feinfraktion aufgrund ihrer stofflichen und geometrischen Inhomogenität ein trennschwieriges Gemisch darstellt, kann bezüglich der Aufbereitung nicht auf die in der Hausmüllaufbereitung etablierte Sortiertechnik zurückgegriffen werden. Der Einsatz von Windsichtern zur Abtrennung heizwertreicher Fraktionen hat sich hinsichtlich der Aufbereitung von deponiebürtigen Abfallströmen nicht behaupten können. Ebenso kann aufgrund der stark verschmutzten Oberflächen der Partikel nicht auf optische Verfahren zur Sortierung zurückgegriffen werden. Eine Verwertung deponiebürtiger Abfallströme setzt voraus, dass die oberflächigen Verschmutzungen weitgehend entfernt werden (DWA, 2012; Hölzle, 2010b; Pretz und Garth, 2012).

2.5.1 Auswahl geeigneter Sortierverfahren zur Aufbereitung der Feinfraktion

Der Begriff Sortieren bezeichnet die Aufteilung eines Stoffgemisches nach Stoffart, unter Ausnutzung eines physikalischen Trennmerkmals. Zu diesen Merkmalen zählen bspw. die Dichte, die elektrische Leitfähigkeit oder Grenzflächeneigenschaften wie zum Beispiel die Oberflächenbenetzbarkeit, aber auch optische Eigenschaften wie das Strahlungsverhalten einzelner Partikel (Schubert, 1996). Sortierverfahren lassen sich in trockene und nasse Verfahren unterteilen (Tabelle 2-15). Die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren sollen nachfolgend kurz erläutert und im Hinblick auf die Aufbereitung feiner Stoffströme bewertet werden.

Tabelle 2-15: Sortierverfahren in der Bauschuttaufbereitung (Umweltbundesamt, 2012)

Trockenverfahren	Nassverfahren
Dichtesortierung <ul style="list-style-type: none"> • Windsichtung 	Dichtesortierung <ul style="list-style-type: none"> • Schwimm- Sink- Sortierung • Schwerkraftsortierung • Filmschichtsortierung • Aufstromsortierung • Setzsortierung
Sortierung in Magnetfeldern <ul style="list-style-type: none"> • Magnetscheidung 	
Trennung nach optischen Eigenschaften <ul style="list-style-type: none"> • Klauben • Optoelektronische Sortierung 	
Sortierung nach mechanischen Eigenschaften <ul style="list-style-type: none"> • Selektive Zerkleinerung mit nachfolgender Klassierung 	

2.5.2 Trockene Sortierverfahren

Zur Abscheidung von leichten Störstoffen wie beispielsweise Holz, Papier oder Kunststoff wird überwiegend auf die Aerosortierung mittels Windsichtern zurückgegriffen, wobei Luft als Trennmedium verwendet wird. Der Nachteil des Verfahrens besteht darin, dass zunächst nur leichte Störstoffe entfernt werden können und die Dichteunterschiede zwischen dem Störstoff und dem Produktstrom ausreichend groß sein müssen. Für einen effektiven Sortierprozess muss das Sortiergut eng klassiert vorliegen und entsprechend konditioniert werden. Die Effektivität der Windsichtung ist abhängig von der Anströmfläche der Partikel, so dass dieser Sortierprozess nicht zur Aufbereitung feiner Fraktionen geeignet ist. Hinsichtlich der Aufbereitung von deponiebürtigen Stoffströmen ist der Einsatz von Windsichtern generell weniger geeignet (Pretz und Garth, 2012; DWA, 2012; Weimann, 2009).

Die Abscheidung von Metallen erfolgt unter Ausnutzung der magnetischen Eigenschaften als Trennmerkmal. Die Anwendung von Magnet- und Wirbelstromscheidern hat sich im Bereich der Abfallaufbereitung in vielen Bereichen etabliert.

Wichtige Sortierverfahren stellt in der Bauschuttaufbereitung zunächst die händische Sortierung zum Entfernen von größeren Fremdstoffen dar (Weimann, 2009). Insbesondere für die Aufbereitung der Feinfraktion ist die händische Sortierung jedoch nicht geeignet.

Optische Sortierverfahren werden in der Bauschuttaufbereitung zum Separieren von Holz oder auch mineralischen Bestandteilen wie zum Beispiel Quarzit oder Feldspat eingesetzt. Anwendbar sind diese Verfahren jedoch nur für Stoffströme mit sauberen Oberflächen (Weimann, 2009). Bezüglich der Aufbereitung deponiebürtiger Abfallströme erscheint der Einsatz optischer Sortierverfahren aufgrund starker Verschmutzungen weniger geeignet (Pretz und Garth, 2012).

Die selektive Zerkleinerung beruht auf unterschiedlichen Zerkleinerungseigenschaften des Sortiergutes und der anschließenden Klassierung nach der Korngröße.

2.5.3 Nasse Sortierverfahren

Nasse Sortierverfahren arbeiten vorwiegend nach dem Prinzip der Dichtentrennung wobei Wasser als Trennmedium eingesetzt wird (Weimann, 2009). Der Vorteil nasser Sortierverfahren gegenüber trockenen Verfahren liegt darin, dass sie eine höhere Trennschärfe und höhere Durchsatzraten aufweisen und höhere Produktqualitäten erzeugt werden können (Wotruba und Weitkämper, 2009; BWT, 2013).

Bei der Schwimm-Sink-Sortierung wird das Sortiergut in ein Trennmedium gegeben, wobei die spezifisch schwereren Partikel sedimentieren (Schwergut) und die spezifisch leichteren Parti-

kel aufschwimmen (Leichtgut). Das Verfahren zeichnet sich auch bei geringen Dichteunterschieden im Sortiergut durch eine hohe Trennschärfe aus und ist für ein breites Spektrum von Partikelgrößen geeignet. Der Einsatz der Schwimm-Sink-Sortierung ist gegenüber konkurrierenden Sortierprozessen, wie beispielsweise der Setztechnik, vor allem auf Grund höherer Kosten weniger verbreitet. Dennoch findet dieses Verfahren im Bereich des Recyclings, zum Beispiel zur Kunststoffsortierung, neue Anwendung (Feil und Rüttinger, 2011; Weimann, 2009; Schubert, 1996; Martens, 2011).

Dem Prinzip der Schwimm-Sink-Trennung zugehörig sind weiterhin Schwerkraft- und Zyklonscheider (Schubert, 2008). Die Schwerkraftsortierung in Form von Hydrorinnen wie beispielsweise Sortierspiralen oder Wendelscheidern wird vor allem zur Sortierung feinkörniger Materialströme mit Partikelgrößen zwischen 0,1 mm und 10 mm eingesetzt (Schubert, 1996). Das Verfahren ist für Stoffströme mit hohem Leichtgutanteil und großen Dichteunterschieden geeignet. Typische Anwendungsgebiete stellen vor allem die Bodensanierung und Kiesaufbereitung dar (Weimann, 2009). Zykclone finden ebenfalls für die Aufbereitung feinkörniger Stoffströme zwischen 0,1 und 10 mm Partikelgröße Anwendung und sind industriell im Bereich der Sand- und Kiesaufbereitung weit verbreitet (Schubert, 2008).

Hydroherde arbeiten nach dem Prinzip der Filmschichtsortierung und sind für die Aufbereitung wertvoller Minerale wie beispielsweise Gold- und Platinerze im Korngrößenbereich $< 75 \mu\text{m}$ geeignet (Schubert, 1996).

Aufstromscheider beruhen auf dem Prinzip der Gegenstromtrennung, wobei die Sinkgeschwindigkeit von Partikeln mit gleicher Größe, aber unterschiedlicher Dichte, genutzt wird (Weimann, 2009). Als Trennmedium wird ein flüssiges Medium eingesetzt. Typische Vertreter stellen Sichter dar. Aufstromsortierer arbeiten in Korngrößenbereichen zwischen 0,8 bis 80 mm Partikelgröße, wobei die Aufbereitung körniger Stoffströme nur beschränkt möglich ist. Die Ursache dafür liegt darin begründet, dass bei körnigen Stoffen lediglich die Korngröße und Partikeldichte die Sinkgeschwindigkeit bestimmen. Eine Aufbereitung derartiger Stoffströme erfordert damit eine sehr enge Vorklassierung. Im Bereich des Recyclings finden Aufstromscheider zunehmend Anwendung, da hier Stoffströme mit ausgeprägten Formunterschieden anfallen, die eine Trennung nach der Sinkgeschwindigkeit begünstigen (Schubert, 1996).

Mit der Setzbetttechnik können Korngemische zwischen 0,1 und 100 mm Partikelgröße bearbeitet werden. Das Verfahren basiert auf einer Dichtentrennung, wobei das Sortiergut von unten durch einen pulsierenden Fluidstrom aufgelockert wird, was zu einer Schichtung spezifisch schwerer und leichter Bestandteile innerhalb des Sortiergutes führt. Die Setzbetttechnik ist einfach zu betreiben, weshalb sie auch zunehmend in der Bauschuttaufbereitung und im Recycling Anwendung findet (Umweltbundesamt, 2012; Schubert, 1996; Pollmanns, 2008; Martens, 2011).

2.5.4 Fazit

In der Praxis werden im Bereich der Bauschuttaufbereitung vorwiegend trockene Sortierverfahren eingesetzt. Diese sind energetisch günstiger, da auf eine Prozesswasseraufbereitung und Reststoffentsorgung verzichtet werden kann. Demgegenüber sind trockene Sortierverfahren auf eine aufwändigere Vorkonditionierung des Sortiergutes sowie auf geeignete Wassergehalte des Sortiergutes angewiesen.

Nasse Sortierverfahren werden zunehmend in der Stahlschrott- oder Baustoffaufbereitung eingesetzt (Schubert, 1996). Durch den Einsatz von Wasser als Trennmedium kann zusätzlich auf die qualitätsbestimmenden Anhaftungen Einfluss genommen werden (Kurkowski und Penzel, 1997; Umweltbundesamt, 2012). Um mineralische Fraktionen aus deponiebürtigen Abfällen zu generieren, welche gleichzeitig den Anforderungen an Recyclingbaustoffen entsprechen, ist nur der Einsatz von nassen Sortierverfahren vielversprechend (Jungmann, 1997). Der Schadstoffgehalt deponiebürtiger Fraktionen resultiert zumindest teilweise aus den feinstkörnigen Anhaftungen an der Partikeloberfläche, welche nur durch eine thermische Behandlung oder durch Waschverfahren beeinflusst werden können. Erste Untersuchungen zur nass-mechanischen Aufbereitung von Feinmaterial wurden diesbezüglich im Rahmen des Deponierückbauprojektes Burghof im Jahr 1996 beziehungsweise der Deponie Sengenbühl im Jahr 1994 durchgeführt (Friedmann und Zollner, 1995; Gäth und Nispel, 2012).

Im Rahmen dieser Arbeit soll speziell auf die Setztechnik eingegangen werden, da diese im Bereich des Deponierückbaus, insbesondere hinsichtlich der Aufbereitung des Feinmaterials, geeignete Kornspektren verarbeiten kann. Weiterhin zeichnet sich die Setztechnik durch hohe spezifische Durchsatzmengen bei geringen Betriebskosten sowie einer einfachen Handhabung aus (*Darmstadter Massivbau-Seminar*, 1997; Schubert, 1996; Umweltbundesamt, 2012; Kurkowski und Penzel, 1997). Positiv zu beurteilen ist ebenso das kompakte Design, die geringe Lärmentwicklung und die geringen aus der Aufbereitung resultierende Umweltbelastungen (Pollmanns, 2008).

In der Tabelle 2-16 werden die Vor- und Nachteile der trockenen beziehungsweise nassen Aufbereitungsverfahren zusammengefasst.

Tabelle 2-16: Vergleich nasser/ trockener Sortiervverfahren (Kurkowski und Penzel, 1997)

Aufbereitungsverfahren	Trockenaufbereitung	Nassaufbereitung
Ziel	Störstoffabtrennung z.B. Holz, Kunststoffe, Papier, Pappe, Leichtbaustoffe usw.	
Trennmedium	Luft	Wasser
Wirkungsprinzip	Unterschiedliche Dichte und Anströmfläche der Materialien	im wesentlichen Dichteunterschiede
	Leichtstoffe werden mittels Luftstrom ausgetragen	Leichtstoffe schwimmen auf
	Schwerstoffe fallen durch den Luftstrom durch	Schwerstoffe sinken ab Dichte > 1 g/cm ³
Trennmerkmale	Dichte, Korngröße, Kornform, Masse	
Ziel	Erschließung hochwertiger Anwendungsgebiete für RC-Baustoffe, Sicherstellung einer ausreichenden Qualität der RC-Baustoffe	
Störstoffentfernung	Regulierung über die Intensität des Luftstromes	nahezu 100 %
Trennerfolg	feuchtigkeitsabhängig	feuchtigkeitsunabhängig
Feinkornanhaftung	ja	nein
Energieaufwand	größer	geringer
Kornklassenauftrennung	eng begrenzt, z.B. 4/8, 8/16, 16/32, 32/45 mm	ja (abhängig vom Verfahren)
Wasserkreislauf	nein	ja
Schlammanfall, -aufbereitung	nein	ja
Wasserverbrauch	zum Befeuchten der Produkte	höher
Wirtschaftlichkeit	in Abhängigkeit von den Produkten	

2.6 Nasssetzen

Setzmaschinen können zunächst hinsichtlich des eingesetzten Trennmediums in Hydro- und Aero-Setzmaschinen unterschieden werden, wobei der Einsatz von Nasssetzmaschinen stärker verbreitet ist. Aero- beziehungsweise Luftsetzmaschinen finden nur bei Sortiergut Anwendung, bei dem die zu trennenden Komponenten einen großen Dichteunterschied aufweisen. Luftsetzmaschinen sind damit zur Aufbereitung von beispielsweise Bauschutt nicht geeignet. Im Nachfolgenden sollen deshalb nur auf Nasssetzmaschinen eingegangen werden (Schubert, 1996).

2.6.1 Grundlagen des Nasssetzens

Neben dem Handklauben ist die Dichtesortierung eines der ältesten und bekanntesten Verfahren zur Trennung von Stoffströmen nach Materialeigenschaften. Das nasse Sortiervverfahren nach dem Prinzip der Setztechnik ist seit Jahrhunderten bekannt und wurde bereits im Jahr 1556 durch Georgius Agricola in einem Bericht über Stauchsetzkästen zur Gewinnung von Erzen erwähnt (Pollmanns, 2008; Weimann, 2009).

Infolge der Mechanisierung des Setzprozesses im 19. Jahrhundert erfuhr dieser eine ständige Weiterentwicklung, wobei Setzmaschinen unterschiedlicher Bauarten und mit verschiedenen Antriebssystemen entwickelt wurden (Pollmanns, 2008). Die Erarbeitung der theoretischen Grundlagen des Setzprozesses erfolgte erst verstärkt in neuerer Zeit, wobei auch aktuell keine geschlossene Theorie diesbezüglich existiert (Schubert, 1996).

Zur theoretischen Erklärung des Setzvorganges in Setzmaschinen wird in der Literatur zumeist die Mayer'sche Potenzialtheorie herangezogen. Diese legt zu Grunde, dass Stoffe bestrebt sind, einen energetisch günstigen Zustand einzunehmen (Schubert, 1996; Müller und Wienke, 2004; Weimann, 2009; Pollmanns, 2008; Kurkowski und Penzel, 1997)

Die Theorie geht davon aus, dass sich das gemischte Sortiergut zunächst in einem energetisch ungünstigen und damit instabilen Zustand befindet und einen stabilen Zustand mit niedriger potentieller Energie anstrebt. Der Gehalt potenzieller Energie wird dabei durch den Schwerpunkt des Sortiergutes beschrieben. Die Verschiebung des Schwerpunktes wird erreicht indem das Sortiergut durch die Zufuhr von Strömungsenergie und Hubarbeit aufgelockert wird, wobei die Widerstandskräfte im Sortiergut aufgehoben werden. Dieser Zustand ermöglicht eine Sortierung des Aufgabegutes nach der Dichte, wobei sich die schweren Partikel des Sortiergutes im unteren Bereich des Aufgabegutes ansammeln beziehungsweise leichtere Partikel verdrängt werden. Die Konsequenz der Entmischung des Sortiergutes ist die Verlagerung des Gesamtschwerpunktes in den unteren Bereich des Sortiergutes beziehungsweise die Verringerung dessen potentieller Energie. Durch die Wiederholung dieses Vorganges kann ein stabiler Zustand im Sortiergut erreicht werden, einen Indikator dafür stellt die Trennschärfe dar ((Mayer, 1950); zitiert bei (Weimann, 2009)).

Das Wirkprinzip des Setzvorganges basiert auf einem regelmäßigen Fluidstrom, welcher das Sortiergut aufwärts durchströmt und auflockert. Das Sortiergut wird dabei zunächst auf einen Setzgutträger in Form eines Rostes oder Siebbelages aufgegeben. Das verwendete Trennmedium, Wasser oder Luft, strömt durch die Öffnungen des Setzgutträgers periodisch auf und ab was zu einer Auflockerung des Sortiergutes führt. Das aufgelockerte Sortiergut bezeichnet man als Setzbett. Der Geschwindigkeitsverlauf des strömenden Fluides nach der Zeit erfolgt symmetrisch beziehungsweise asymmetrisch und wird durch Setz-Hub-Diagramme beschrieben. Infolge der Auflockerung des Sortiergutes ordnen sich schließlich die spezifisch leichteren Partikel über den spezifisch schwereren Partikeln an, was zu einer Schichtung des Partikelgemisches nach der Dichte führt. Diese Schichtung kann weiterhin durch eine Schichtung gemäß der Partikelgröße überlagert werden (Schubert, 1996; LFU, 1993; Martens, 2011).

Eine Sortierung nach der Dichte erfolgt auch im ruhenden Fluid aufgrund von Sedimentationsvorgängen. Ausschlaggebend dafür ist die Sinkgeschwindigkeit der Partikel, welche durch die Partikelgröße, -dichte und -form bestimmt wird (Schubert, 1996). Die Setztechnik intensiviert

diesen Trenneffekt, da der Sedimentationseffekt aufgrund der Pulsation mehrfach stattfindet (Weimann, 2009). Das Wirkprinzip des Sortierens durch Setzen ist in der Abbildung 2-7 dargestellt.

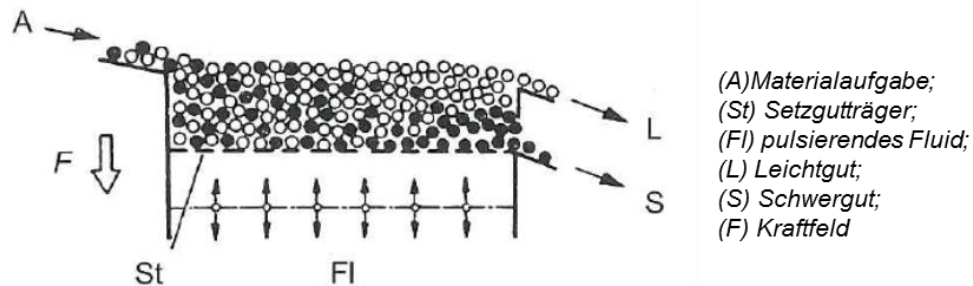


Abbildung 2-7: Wirkprinzip der Sortierung durch Setzen (Schubert, 2008)¹

2.6.2 Aufbau von Nasssetzmaschinen

Der prinzipielle Aufbau einer Nasssetzmaschine ist in der Abbildung 2-8 dargestellt. Das Sortiergut gelangt zunächst über einen Aufgabetrichter in das Setzfass beziehungsweise auf den Setzbetträger, welcher aus einem Siebbelag besteht. Auf dem Setzgutträger wird das Sortiergut vom Fluid, nachfolgend als Prozesswasser bezeichnet, vertikal pulsierend von unten durchströmt, aufgelockert und gemäß der Dichte sortiert. Die vertikale Bewegung des Waschwassers innerhalb der Setzmaschine wird über Membranen oder Kolben aufgebracht.

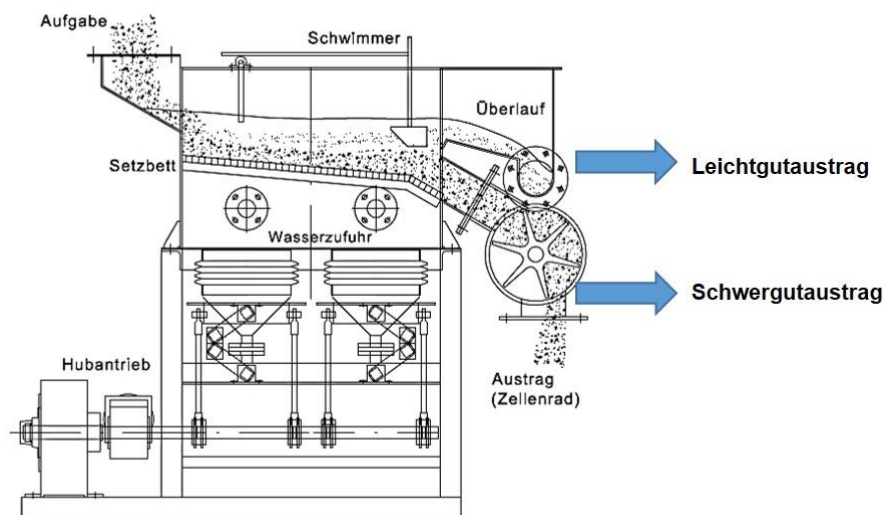


Abbildung 2-8: Prinzipieller Aufbau der verwendeten Nasssetzmaschine (AGS, 2014)

¹ Schubert: Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik, Band II. S.635, 2008, Copyright Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Reproduced with permission.

Insgesamt lassen sich die Vorgänge innerhalb der Nasssetzmaschine folgendermaßen untergliedern (Magin, 1997); zitiert bei (Müller und Wienke, 2004)

- Auflockern des Setzbettes,
- Sortieren der Partikel nach der Dichte während der Sedimentationsphase,
- Transport,
- Austrag der Stoffströme.

2.6.3 Betriebsparameter von Nasssetzmaschinen

Der Sortiererfolg ist abhängig von der geeigneten Auswahl der Prozessparameter Hubhöhe, Hubzahl, der Setzbetthöhe und dem Unterwasserstrom, (Schubert, 1996). Diese Parameter bilden variable Steuerungsmöglichkeiten der Setzmaschine und sie müssen an das zu behandelnde Sortiergut abgestimmt werden. Weitere Betriebsparameter, die einen Einfluss auf die Schichtung ausüben, sind die Setzbettfläche und die Setzbettneigung. Diese Parameter sind konstruktionsbedingt vorgegeben und nicht variabel. Nachfolgend sollen die wesentlichen Einflussgrößen vorgestellt werden.

Hubhöhe:	Der Hub dient der Auflockerung des Sortiergutes. Je nach Sortiergut liegt der Hub zum Beispiel bei Anwendung in der Erzaufbereitung im Bereich zwischen 3 mm und 200 mm.
Hubzahl:	Die Hubzahl ist ebenfalls verantwortlich für die Materialauflockerung und wird in Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung und Dichte des zu bearbeitenden Sortiergutes gewählt. In der Praxis finden Hubzahlen zwischen 30 bis 150 min ⁻¹ Anwendung (Schubert, 1996).
Pulsationsverlauf:	Der Pulsationsverlauf beeinflusst sowohl die Materialauflockerung als auch das Setzverhalten des Sortiergutes. In der Praxis werden symmetrische und asymmetrische Setzzyklen angewendet.
Setzbetthöhe:	Eine optimale Setzbetthöhe bestimmt im Wesentlichen den Trennerfolg. Die Höhe des Setzbettes kann messtechnisch erfasst und überwacht werden. Eine Regulierung der Setzbetthöhe erfolgt über den Austrag des Schwergutes.
Austrag:	Der Austrag des Schwergutes kann in Abhängigkeit von der Setzbetthöhe wahlweise automatisch oder manuell, beispielsweise mittels Zellrad, erfolgen.
Unterwasserstrom:	Der Unterwasserstrom beeinflusst die Auflockerung des Setzbettes. Der Zufluss wird durch die Leistung der Kreislaufwasserförderpumpe reali-

siert und durch Ventilsteuerung geregelt. In der Praxis liegen die Strömungsgeschwindigkeiten für den Unterwasserstrom im Allgemeinen unter 0,6 cm/s (Schubert, 1996).

Neigung: Die Neigung des Setzbettes sorgt für den Transport des Setzbettes. Der Neigungswinkel ist konstruktionsbedingt fest vorgegeben.

2.6.4 Einflussfaktoren auf den Setzprozess

Der Erfolg des Setzprozesses ist von mehreren Parametern abhängig, welche jeweils im Zusammenwirken betrachtet werden müssen, z.B. physikalische Eigenschaften des Trennmediums in Form von Dichte und Viskosität. Weitere Einflussgrößen bilden die Betriebsparameter Hub, Hubzahl, Setz-Hub-Diagramm, die Setzbethöhe, die Unter- und Transportwassermenge und der spezifische Durchsatz. Die zweite Gruppe der relevanten Parameter sind abhängig vom Sortiergut, hierzu zählt die Korngrößen- und Dichtezusammensetzung. Die wesentlichen Parameter welche den Setzvorgang beeinflussen werden nachfolgend vorgestellt (Schubert, 1996; Müller et al., 2010; LFU, 1993; Martens, 2011).

Der Hub, die Hubzahl sowie der Hubverlauf und der Unterwasserstrom bestimmen die Auflockerung des Sortiergutes. Der Hub ist nach der oberen Korngröße des Sortiergutes festzulegen. Die Hubhöhe ist dabei mit zunehmender Korngröße des Aufgabegutes zu steigern. Der Hub kann in Abhängigkeit der oberen Aufgabekorngröße entsprechend Formel 2-1 ermittelt werden (Schubert, 1996; Müller und Wienke, 2004; Weimann, 2009).

$$h = 8,1 * D_0^{0,6} \quad (\text{Formel 2-1})$$

h = Hub [mm]

D_0 = obere Aufgabekorngröße [mm]

Die Hubzahl ist in Abhängigkeit vom Hub und dem Unterwasserstrom festzulegen. Die optimale Hubzahl ist abhängig von der Beschaffenheit des Sortiergutes und experimentell zu ermitteln, wobei diese mit Abnahme der Partikelgröße zunehmen sollte. (Weimann, 2009; Schubert, 1996).

Der Einfluss des Pulsationsverlaufes beziehungsweise des Setz-Hub-Diagrammes auf den Setzprozess wird in der Literatur unterschiedlich bewertet (Schubert, 1996; Müller und Wienke, 2004). In der Praxis finden symmetrische sowie asymmetrische Setz-Hub-Diagramme Anwendung (Schubert, 1996). Der symmetrische Setzzyklus verläuft sinusförmig, wobei der Aufstrom durch das Unterwasser verstärkt und der Abstrom gedämpft wird. Somit erfolgt eine Auflockerung des Sortiergutes im Aufstrom und eine Sortierung im beruhigenden Abstrom. Asymmetrische Setzzyklen weisen einen verlangsamten Abstrom auf, womit das Ziel verfolgt wird, den

Auflockerungszustand lange aufrecht zu erhalten. Möglich sind auch Setzzyklen mit starken Aufstrom, so dass das gesamte Setzbett angehoben wird, das Absetzen des Setzbettes erfolgt dann im ruhendem Fluid (Schubert, 1996). Experimentelle Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses des Setz-Hub-Diagrammes haben ergeben, dass sich eine größere Setzdauer positiv auf den Trennprozess auswirkt. Hinsichtlich der Schwingungsform konnten die besten Ergebnisse durch asymmetrische Setzzyklen erreicht werden (Müller und Wienke, 2004).

Der Unterwasserstrom beeinflusst die Auflockerung des Sortiergutes im wesentlichen Maß, so dass eine ausreichende Bemessung sowie ein konstanter Unterwasserstrom für den Setzprozess elementar ist.

Die Höhe des Setzbettes ist nach mehreren Kriterien festzulegen. Zunächst muss die Setzbetthöhe ausreichend hoch sein, um das Ausbilden abgrenzbarer Teilschichten zu ermöglichen. In der Praxis wird hierzu die Annahme getroffen, dass die Setzbetthöhe dem dreifachen der oberen Aufgabekorngröße entsprechen soll. Bezüglich der Auflockerung des Sortiergutes ist dagegen eine möglichst geringe Setzbetthöhe zu wählen. Ist die Setzbettschicht zu groß oder die Auflockerungsgeschwindigkeit nicht ausreichend, erfolgt keine vollständige Auflockerung des Setzbettes. Die Setzbetthöhe wird damit vorwiegend durch die Parameter Korngrößen- und Dichtezusammensetzung des Sortiergutes bestimmt. Einen weiteren Einfluss übt die Setzbettfläche aus. Die Setzbetthöhe sollte mit der Fläche des Setzbettes zunehmen, da eine gleichmäßige Verteilung des Sortiergutes mit Zunahme der Setzbettfläche abnimmt. Im Hinblick auf den spezifischen Durchsatz sind zu hohe Setzbetthöhen zu vermeiden (Schubert, 1996). In Versuchen konnte zudem gezeigt werden, dass mit abnehmender Setzbetthöhe der Trennerfolg zunimmt (Müller und Wienke, 2004).

Der spezifische Durchsatz gibt die Menge Sortiergut an, welche pro Quadratmeter Siebfläche innerhalb einer Stunde verarbeitet werden kann. Dieser wird durch die geforderte Trennschärfe vorgegeben und durch die Breite und Höhe des Setzbettes beeinflusst. Voraussetzung für einen optimalen spezifischen Durchsatz und gute Trennergebnisse stellt dabei eine gleichmäßige Beschickung der Setzmaschine dar. Typische spezifische Durchsätze für Hydrosetzmaschinen liegen zum Beispiel bei der Anwendung in der Erzaufbereitung im Bereich von $2 \text{ Mg/m}^2\text{h}$ bis $16 \text{ Mg/m}^2\text{h}$ (Schubert, 1996; Wotruba und Weitkämper, 2009)

Die Dichte- und Viskositätseigenschaften des Trennmediums beeinflussen den Setzprozess maßgeblich. Die Herstellung homogener Auflockerungszustände des Sortiergutes lassen sich mit Wasser besser erreichen als mit Luft. Der Einsatz von Aerosetzmaschinen ist damit auf wenige spezielle Anwendungsfälle begrenzt (Schubert, 1996).

Die Korngrößenzusammensetzung, die Kornform und die Dichteverteilung beeinflussen den Setzprozess seitens des Sortiergutes. Die Korngrößenzusammensetzung beeinflusst die Lockerungsgeschwindigkeit des Sortiergutes. Je feiner das Sortiergut ist und je geringer die Porosität im Setzbett ist, desto geringer ist die Auflockerungsgeschwindigkeit. Im Allgemeinen können bei nassen Verfahren breitere Partikelgrößenspektren verarbeitet werden als bei Aerosetzmaschinen (Schubert, 1996).

Die Anströmfläche der Partikel beziehungsweise die Partikelform beeinflussen den Setzprozess maßgeblich, da sich rundliche Partikel schneller im Setzbett ordnen als flächige Partikel (Schubert, 1996).

Die verfahrenstechnische Auslegung der Nasssetzmaschinen erfolgt in der Regel auf Grund von Erfahrungswerten aus der Praxis (Müller und Wienke, 2004). Eine detaillierte Beschreibung des Setzvorganges als stochastischer Prozess ist aufgrund des Zusammenwirkens verschiedenster Einflussfaktoren wie beispielsweise der Kornform, der Verdrängungsarbeit absinkender Partikel oder Bewegung des Setzbettes auf dem Setzgutträger und der oben genannten Parameter schwierig (Schubert, 1996; Pollmanns, 2008).

2.6.5 Einsatz von Nasssetzmaschinen in der Praxis

Aufgrund der Robustheit, der geringen Durchsatzkosten, der einfachen Prozessführung und der guten Trennergebnisse hat sich die Setztechnik als Aufbereitungsverfahren in vielen Bereichen etabliert. Anwendung findet die Setztechnik zum Beispiel im Bereich der Fein- und Stückkohleaufbereitung. Ein weiteres Einsatzfeld stellt die Anreicherung von Gold, Zinn-, oder Manganerzen dar (Schubert, 1996). Im Bereich der Kies- und Sandaufbereitung werden Setzmaschinen eingesetzt, um den Anteil betonschädlicher organischer oder alkalireaktiver Bestandteile zu reduzieren, welche durch Aufquellen zu Bauwerksschäden führen können. Weitere Anwendungsgebiete stellen die Abtrennung von Ziegel oder das Aussortieren von Muscheln aus Flussskies dar (Pollmanns, 2008; Patzold et al., 2008). Die Setztechnik findet zunehmend auch im Bereich des Recyclings Anwendung. Hierzu zählt zum Beispiel die Aufbereitung von NE-Metall-Vorkonzentrat aus der Stahlschrottaufbereitung, die Sortierung von Kabelschrott oder die Abtrennung von Kunststoffen aus Elektronikschrott. Ein weiteres Einsatzgebiet stellt die Bauschutttaufbereitung dar, wobei Verunreinigungen wie beispielsweise Lehm, Papier, Humusstoffe oder Kunststoffe durch einen Waschvorgang aus dem trennschwierigen Ausgangsstoff abgetrennt werden können (Schubert, 1996; Pollmanns, 2008; Weimann, 2009) und die Bodenwäsche zur Abreicherung von Schadstoffen (LFU, 1993).

2.7 Schlussfolgerungen

Kapitel 2 „Grundlagen“ beinhaltet eine Sachstandsanalyse zur Verwertung der Feinfraktion (<60 mm) aus dem Deponierückbau. Ausreichende Informationen zu deren Mengen und Qualitäten liegen nicht vor, da die Feinfraktion bei den bisher durchgeführten Deponierückbauprojekten kaum Beachtung fand. Entsprechend gering ist auch der Kenntnisstand hinsichtlich geeigneter Aufbereitungs- und Konfektionierungsverfahren sowie zu den erzielbaren Produktqualitäten. Ökonomische und ökologische Betrachtungen fehlen vollständig. Darüber hinaus enthält Kapitel 2 eine Analyse über Qualitätsanforderungen, die für Stoffströme aus der Feinfraktion erzielt werden müssen, um eine nachhaltige Verwertung bzw. Vermarktung zu sichern. Für die mineralische Fraktion, als massenmäßig bedeutsamer Stoffstrom, erscheint als Zielvorgaben die TL-Gestein-StB in Verbindung mit der Mitteilung M 20 der LAGA als Orientierung für die zu erreichende Produktqualität geeignet. Für den ebenfalls massenmäßig stark vertretenen heizwertreichen Komponenten aus der Feinfraktion wurden die Vorgaben der Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz (BGS), formuliert im RAL-GZ 724, herangezogen. Die Betrachtung in Frage kommender Aufbereitungsverfahren hat die nassmechanische Aufbereitung, speziell die Setztechnik, als am aussichtsreichsten eingestuft.

Folgende wissenschaftlich-technische Fragestellung leiten sich aus diesem Sachverhalt ab:

- Charakterisierung der Feinfraktion aus dem Deponierückbau;
- Überprüfung der Leistungsfähigkeit der Nasssetztechnik inkl. ggf. des notwendigen Anpassungsbedarfes;
- Bedarfsermittlung für weiterführende Konfektionierungsmaßnahmen zum Erreichen der gesetzten Qualitätsziele für die erzeugten Produkte zur Verwertung;
- Spezifizierung der Auslegungskenngrößen für die Aufbereitungs- und Konfektionierungsschritte;
- Bereitstellung von Stoff- und Energiebilanzen;
- Bereitstellung von Daten für ökonomische und ökologische Betrachtungen.

3 Material und Methoden

3.1 Ausgangsmaterialien

3.1.1 Deponie Pohlsche Heide

Das im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Deponat entstammt der Siedlungsabfalldéponie Pohlsche Heide im Landkreis Minden-Lübbecke, Nordrhein-Westfalen. Die Deponie ist Bestandteil des Entsorgungszentrums Minden-Lübbecke und wurde Ende des Jahres 1988 in Betrieb genommen. Sie entspricht der Deponieklasse DK II und ist als Haldendeponie, bestehend aus zwei Deponieabschnitten, ausgeführt. Beide Abschnitte verfügen über eine Basisabdichtung sowie eine Sickerwasserefassung und Deponieentgasung, sie unterscheiden sich in Details der Bauausführung.

Die Verfüllung des Deponieabschnittes I erfolgte im Zeitraum zwischen 1988 und 2005, wobei auf einer Fläche von 18 Hektar etwa $2,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ unbehandelte Abfälle abgelagert wurden. Die Entwicklung der Mengen der angelieferten beziehungsweise der abgelagerten Abfälle auf dem Deponieabschnitt I ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Der Deponieabschnitt II wird seit dem Jahr 2005 mit mechanisch-biologisch vorbehandeltem Haus- und Gewerbeabfall verfüllt und ist hinsichtlich des vorhandenen Wertstoffpotenziales nicht von Relevanz für Deponierückbaumaßnahmen.

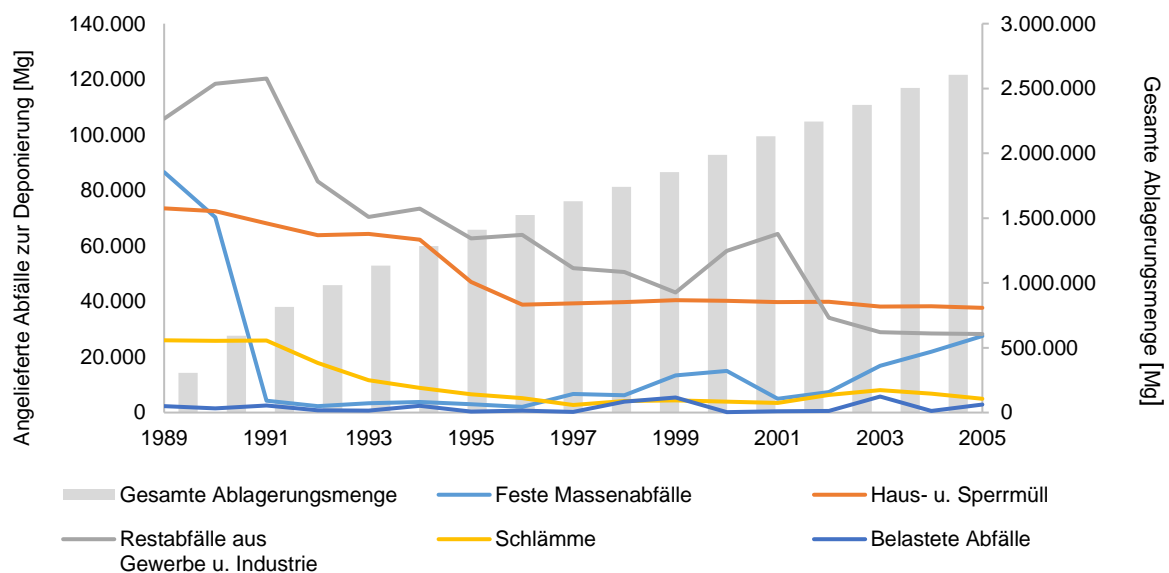


Abbildung 3-1: Mengen zu deponierender Abfälle (Fricke et al., 2016a)

Unter den Begriff der festen Massenabfälle (Abbildung 3-1) wurden vom Deponiebetreiber mineralische Stoffströme wie beispielsweise Bauschutt und Erde zusammengefasst. Die Ablagerungsmengen für diesen Stoffstrom nehmen zwischen den Jahren 1989 und 1991 deutlich

ab. Ursache für diese Entwicklung ist das praktizierte Bauschuttkonzept, welches der Aufbereitung von Bauschutt dient, so dass dieser Massenstrom keiner Deponierung mehr zugeführt wird (siehe auch Kapitel 2.3).

Die Ursache für die sinkenden Mengen der Haus- und Sperrmüllfraktion resultieren aus der Inbetriebnahme der Kompostierungsanlage im Jahr 1995 und der getrennten Sammlung und Verwertung von Grün- und Bioabfällen. Weiterhin führte das Inkrafttreten der Verpackungsverordnung im Jahr 1991, siehe auch Kapitel 2.3, zu einer Reduktion der Restabfälle (Fricke et al., 2016a).

3.1.2 Materialentnahme

Die Planung und Durchführung der Rückbaumaßnahme erfolgte entsprechend der Vorgehensweise gemäß Tabelle 2-2. Nach der historischen Erkundung des Deponiestandortes erfolgte die Voruntersuchung des Deponats mittels Probebohrungen, ausgeführt als verrohrte Schneckenbohrung mit Ø 219 mm (Fricke et al., 2016a). Entsprechend der gewählten Positionierung wurden drei Schurfe angelegt (Abbildung 3-2) wodurch Deponat aus verschiedenen Ablagerungszeiträume gewonnen und analysiert werden sollte. Die Materialentnahme erfolgte mittels Bagger als Tiefengrabung. Je Schurf wurden ca. 2.600 m³ Deponat aufgenommen. Die Gesamtmasse des Aushubes betrug 8.700 Mg Deponat und 2.300 Mg Bodenmaterial aus der Oberflächenabdeckung (Münnich et al., 2015).

Bedingt durch den hohen Anteil an großteiligen Geotextilien im Material von Schurf drei weicht die Qualität von Schurf 3 deutlich von den der Schürfe 1 und 2 ab. Nach Einschätzung des Deponiebetreibers ist der hohe Anteil an Geotextilien außergewöhnlich und daher als nicht repräsentativ einzustufen. Das Material von Schurf 3 ist daher für verschiedene Untersuchungen verworfen worden.

Das Deponat wurde nach dem Ausbau auf die Plateaufläche der Deponie verbracht und einer kombinierten Vorkonditionierung und Grobaufbereitung mit mobiler Aufbereitungstechnik unterzogen (Abbildung 3-3). Zunächst erfolgte zum Schutz der Aufbereitungsaggregate eine Aufschlusszerkleinerung des Deponates > 500 mm sowie eine Eisenabscheidung. Anschließend wurde das Deponat einer Siebklassierung mit einem Siebschnitt von 25 mm bzw. 60 mm unterzogen. Der Siebunterlauf (Feingut < 25 mm bzw. < 60 mm) wurde anschließend, getrennt nach Schurf, für die weiteren Behandlungsschritte auf der Plateaufläche der Deponie offen zwischengelagert. Für eine Mischprobe des Feinmaterials < 60 mm erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt eine zusätzliche Siebung mittels Trommelsieb, bei einem Siebschnitt von 10 mm. Das damit erzeugte Feingut mit der Partikelgröße 10 - 60 mm wurde ebenfalls für weitere Behandlungsschritte offen auf der Plateaufläche der Deponie zwischengelagert.

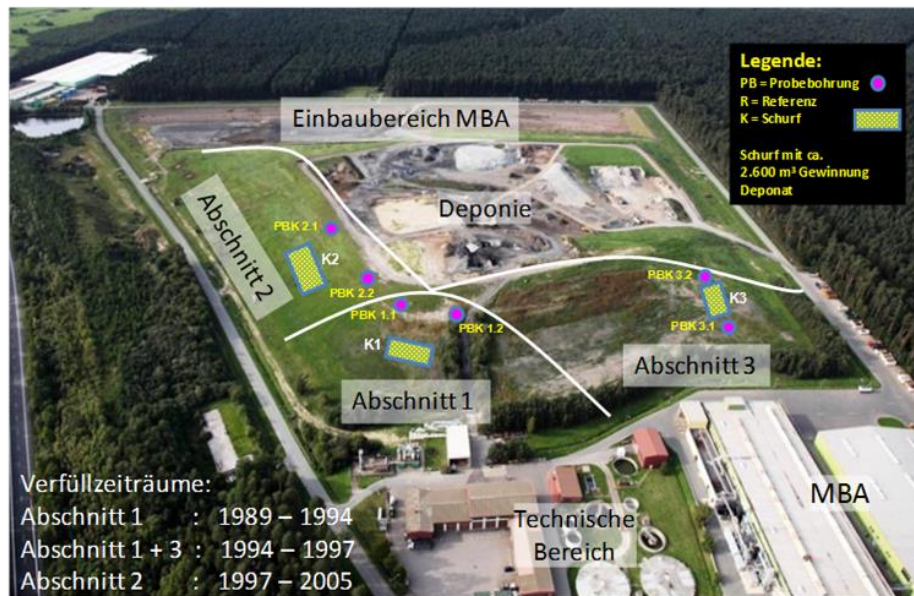


Abbildung 3-2: Schurfe und Ablagerungszeiträume (Fricke et al., 2016a)

Durch die sich anschließende ballistische Separation des Siebdurchganges (Grobgut > 25 mm bzw. > 60 mm) erfolgte eine produktorientierte Stoffstromtrennung, wobei ein Schwergut und ein Leichtgut zur weiteren Aufbereitung bzw. Verwertung erzeugt wurde (Krüger et al., 2016). Die erzeugten Stoffströme wurden anschließend, getrennt nach Schurf, für die weitere Behandlung auf der Plateaufläche der Deponie offen zwischengelagert.

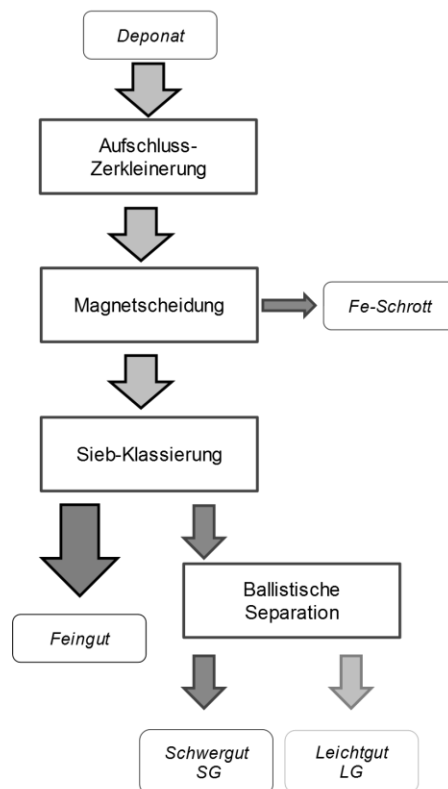


Abbildung 3-3: Aufbereitung des Deponates (Krüger et al., 2016)

3.2 Versuchsaufbau zur nassmechanischen Aufbereitung

3.2.1 Verfahrenskonzept

Die Aufbereitung der Feinfraktion erfolgte im halbertechnischen Maßstab mit einer Versuchsanlage (Abbildung 3-4) zur nassmechanischen Aufbereitung von trennschwierigen Roh- und Reststoffen wie beispielsweise Schlacken, Erzen, Mineralien, Straßenkehricht und Industrieabfällen. Das Kernstück der Versuchsanlage bildet die von der Firma AGS Anlagen + Verfahren GmbH entwickelte Nasssetzmaschine vom Typ „Triple A“. Diese Maschine ist gemäß Herstellerangaben für Stoffströme mit einer Partikelgröße bis zu 35 mm ausgelegt und leistet in Abhängigkeit vom Aufgabegut einen Durchsatz von 1,5 Mg/h bis 25 Mg/h.

Aus der Feinfraktion werden infolge der Dichtesortierung drei Stoffströme erzeugt, welche nachfolgend als Leichtgut-, Schwergut- und Feingutausstrag bezeichnet werden.

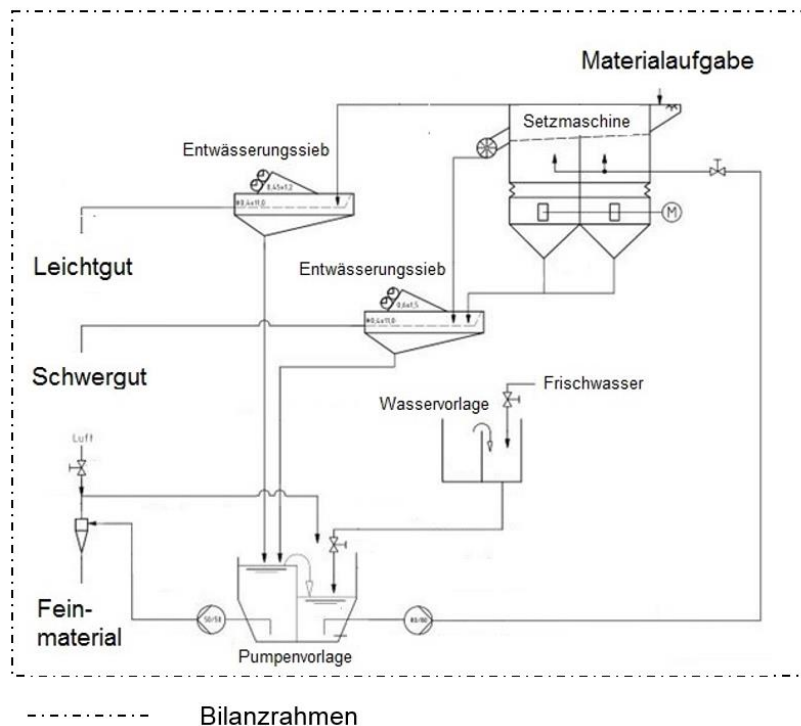


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung der Versuchsanlage (AGS, 09.2013).

3.2.2 Versuchsanlage

Die Versuchsanlage (Abbildung 3-4) stellt ein vereinfachtes Verfahren zur nassmechanischen Aufbereitung von Deponat dar und setzt sich aus der Setzmaschine, dem Wasserkreislauf sowie den Entwässerungssieben zusammen. Zusätzlich wird in der Praxis üblicherweise eine Vorkonditionierung des Aufgabegutes z.B. mittels eines Schwertwäschers vorgenommen, um das Material besser aufzuschließen und abschlammfähige Bestandteile abzutrennen. Im Rahmen der Versuchsdurchführungen konnte eine entsprechende Vorkonditionierung des Deponates nicht realisiert werden.

Setzmaschine

Bei der verwendeten Setzmaschine vom Typ „Triple A 400 x 1000“ handelt es sich um eine Membran-Hydrosetzmaschine (Abbildung 2-8) mit einer Setzbettfläche von 410 x 1012 mm. Die Hubbewegung zur Auflockerung des Schüttgutes wird über die Hubmembranen und durch ein Hubgetriebe mit Exzentrerscheibe erzeugt. Der Antrieb der Setzmaschine erfolgt elektrisch.

Das Aufgabegut gelangt zunächst über den Aufgabetrichter auf den Setzbettgutträger, wobei der Materialfluss aus dem Aufgabetrichter in das Setzfass durch einen höhenregulierbaren Schieber beeinflusst werden kann. Der Setzbettträger besteht aus einem Siebbelag mit Spaltöffnungen von 2 x 10 mm. Durch die Spaltöffnungen wird das Schüttgut vom Prozesswasser vertikal pulsierend von unten durchströmt und dabei aufgelockert. Der Materialtransport innerhalb des Setzfasses erfolgt aufgrund der Neigung des Setzbettträgers, der eingetragenen Hubenergie und dem nachrückenden Aufgabegut.

In Abhängigkeit von der Sinkgeschwindigkeit der Partikel vollzieht sich im Schüttgut eine Schichtung. Die spezifisch leichteren Partikel sammeln sich im oberen Bereich der Schüttung und die spezifisch schweren Partikel im unteren Bereich an. Durch die Erfassung der Grenzschicht zwischen dem spezifisch schwereren und leichteren Material innerhalb der Schüttung kann das Schwergut durch eine drehzahlgeregelte Zellenradschleuse kontinuierlich aus dem Setzfass abgezogen werden. Die Grenzschichterfassung erfolgt mittels Wegaufnehmer und einem Schwimmer (Abbildung 2-8), wobei die Höhe der Schwergutschicht durch die Anlagensteuerung erfasst und reguliert werden kann. Das Leichtgut wird zusammen mit dem Prozesswasserüberlauf aus der Maschine ausgetragen.

Der Setzprozess kann durch die Variation der Prozessparameter Aufstromwasservolumen, Setzbethöhe, Hubfrequenz, Hubamplitude und dem Hubverlauf gemäß dem Setzhubdiagramm beeinflusst werden. Die Parameter wirken wechselseitig aufeinander und müssen in Abhängigkeit von den Charakteristika des Aufgabegutes vor dem Einsatz der Maschine festgelegt werden (siehe Kapitel 2.6.3 ff).

Richtwerte für die einzustellenden Prozessparameter von Setzmaschinen sind beispielsweise aus der Erz- und Kohleaufbereitung bekannt. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei Deponat jedoch um einen stofflich sowie geometrisch sehr inhomogenen Stoffstrom, so dass auf vorhandene Erfahrungswerte nicht zurückgegriffen werden kann. Für die Versuchsdurchführungen wurden deshalb Werte für die Setzbethöhe, Hubamplitude und Hubfrequenz verwendet, die vom Anlagenhersteller empfohlen wurden. Als Hubbewegung wurde vom Anlagenhersteller für die Aufbereitung des Deponates eine asymmetrische Schwingungsform mit verlangsamten Abstrom (Schubert, 1996) empfohlen. Die verwendeten Prozessparameter sind in der Tabelle 3-1 aufgelisteten.

Tabelle 3-1: Prozessparameter der Nasssetzmaschine

Prozessparameter	verwendete Einstellung
Setzbethöhe	25 mm
Setzbett -Länge	1.012 mm
Setzbett- Breite	410 mm
eff. Setzfläche	0,38 m ²
Hubzahl/Setzfrequenz	65 min ⁻¹
Hubhöhe	85 mm
Pulsationsverlauf	Asynchronbewegung mit ver- langsamten Abstrom
Austragsvorrichtung (Zelleradschleuse)	automatisch
Neigung des Setzbettes	ca. 5 °
Beschickung	kontinuierlich
Kreislaufführung Waschwasser	Ja
Wehrhöhe der Materialaufgabe	110 mm

Entwässerungssiebmaschinen

Sowohl der Leichtgut- als auch der Schwergutaustrag wurde Entwässerungssieben zugeführt, welche als elektrisch angetriebene Linearschwinger mit Unwuchtantrieb ausgeführt waren. Die linear, schräg aufwärts gerichteten Schwingungen dienen dabei dem Stoffstromtransport und begünstigen den Entwässerungsvorgang. Die Spaltweite der Spaltböden betrug für beide Entwässerungssiebe 0,4 x 10 mm. Der Einbau der Schwingsiebmaschinen konnte bezogen auf die Neigung der Spaltböden variabel, in einem Winkel zwischen 0° bis 5° in Richtung des Trichteraustrages steigend erfolgen. Im Rahmen der Versuchsdurchführung erfolgte der Einbau im geeigneten Winkel, woraus eine Verlängerung der Verweilzeit der Materialströme auf dem Spaltboden resultiert und der Entwässerungsvorgang begünstigt wird. Der tatsächliche Neigungswinkel der Spaltböden wurde im Rahmen der Versuchsdurchführungen nicht ermittelt. Der Austrag der Materialströme erfolgte über den Trichterauslauf mit Stauleiste. Unterhalb des Trichterauslaufes wurde der Leichtgut- und Schwergutaustrag in Müllgroßbehältern aufgefangen.

Prozesswasserkreislauf

Die Versuchsanlage verfügt über einen geschlossenen Prozesswasserkreislauf (Abbildung 3-4). In der Praxis wird der Prozesswasserbedarf z.B. bei der Aufbereitung von Kies mit 180 - 300 m³/h bei einem Feststoffdurchsatz von 80 - 120 m³/h angegeben (Schubert, 1996).

Bei einer angenommenen Schüttdichte von Kies mit $1,5 \text{ Mg/m}^3$ ergibt sich daraus ein Prozesswasser-Feststoffverhältnis von mindestens 1,5 zu 1. Dieses Verhältnis muss durch Regulierung des Volumenstroms des Prozesswassers in Abhängigkeit des Durchsatzes an Feststoff aufrechterhalten werden. Die Bestimmung des tatsächlichen Prozesswasser-Feststoffverhältnisses war im Rahmen der Versuchsdurchführung nicht möglich, da eine Volumenstrommessung im Prozesswasserkreislauf aufgrund fehlender Beruhigungsstrecken nicht realisierbar war. Die einzelnen Komponenten des Prozesswasserkreislaufes werden nachfolgend kurz erläutert.

Der Wasservorlagebehälter fasst ein Volumen von $1,2 \text{ m}^3$ und dient dem Befüllen der Anlage mit Frischwasser vor der Inbetriebnahme beziehungsweise der Frischwasserergänzung während des Betriebes.

Der Pumpenvorlagebehälter ist in zwei Kammern unterteilt und fasst insgesamt ein Volumen von 1 m^3 . Das Brauchwasser aus der Setzmaschine und den Entwässerungssieben wird in der linken Kammer des Pumpenvorlagebehälters (Abbildung 3-4) gesammelt und anschließend dem Wasseraufbereitungskreislauf mit integriertem Hydrozyklon zugeführt. Die rechte Kammer des Pumpenvorlagebehälters dient als Speicher für den Prozesswasserkreislauf der Setzmaschine. Sie wird durch das gereinigte Brauchwasser aus dem Überlauf des Hydrozyklons beziehungsweise aus dem Überlauf der linken Kammer des Pumpenvorlagebehälters gespeist.

Der Prozesswasserkreislauf ist mit einer elektrisch betriebenen Förderpumpe und einer theoretischen Förderleistung von $50 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgestattet, wobei der tatsächlich geförderte Volumenstrom durch den Druckverlust innerhalb der Versuchsanlage beeinflusst wird. Die Regulierung der Aufstromwassermenge erfolgt per Hand über einen Flachschieber, wobei sich durch die Reduktion der Aufstromwassermenge der Druckverlust im System erhöht und die Förderleistung der Pumpe sinkt.

Das gesamte im Prozesswasserkreislauf enthaltene Wasservolumen setzt sich aus dem Volumen des Pumpenvorlagebehälters und dem Füllvolumen der angeschlossenen Schläuche und der Setzmaschine zusammen. Das Füllvolumen der Setzmaschine und Schläuche liegt in Abhängigkeit von der angeschlossenen Schlauchlänge zwischen $0,5$ bis 1 m^3 . Das Gesamtvolumen des Prozesswasserkreislaufes im einsatzbereiten Zustand wird für die nachfolgenden Betrachtungen mit $1,5 \text{ m}^3$ angenommen.

Zum Entleeren des Prozesswasserkreislaufes besitzt der Pumpenvorlagebehälter einen Bodenablass. Das Abwasser aus der Versuchsanlage wurde in ein anliegendes Speicherbecken geleitet und einer Abwasserbehandlung zugeführt.

Wasseraufbereitungskreislauf

Die Versuchsanlage verfügt über einen Wasserkreislauf zur Aufbereitung des Prozesswassers. Die Aufbereitung erfolgt dabei mittels Hydrozyklon, wobei feinkörnige Partikel aus dem Brauchwasser abgeschieden werden. Schwebstoffe in Form von abschlämbbaren Bestandteilen sowie wasserlösliche Bestandteile werden durch die Aufbereitungsstufe nicht erfaßt (LFU, 1993) und gelangen durch den Überlauf zurück in den Prozesswasserkreislauf.

Der Wasseraufbereitungskreislauf wird durch eine elektrisch betriebene Förderpumpe mit einer konstanten Förderleistung von 20 m³/h aus dem Sumpf des Pumpenvorlagebehälters gespeist. Der gereinigte Überlauf aus dem Hydrozyklon wird anschließend dem Prozesswasserkreislauf zugeführt. Der Unterlauf des Hydrozyklons bildet den Feingutaustrag, welcher in Kunststofffässern aufgefangen wurde.

3.2.3 Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Versuche erfolgte auf dem Gelände des Entsorgungszentrums Pohlsche Heide und wird in die Phasen Versuchsvorbereitung, Versuchsdurchführung und Versuchsnachbereitung untergliedert.

Versuchsvorbereitung

Die Versuchsvorbereitung beinhaltet zunächst das Befüllen des Prozesswasserkreislaufes. Hierzu wurde das am Versuchstandort zur Verfügung stehenden Nutzwasser eingesetzt. Unter der Bezeichnung Frischwasser wird im Folgenden sämtliches Nutzwasser verstanden, welches sich innerhalb der Versuchsanlage befindet und nicht im Kontakt mit Deponat stand. Der Verbrauch an Frischwasser wurde bei jeder Befüllung der Versuchsanlage mittels Wasseruhr vermerkt. Die Befüllung der Versuchsanlage mit Frischwasser entfiel, wenn Prozesswasser aus vorangegangenen Versuchen verwendet wurde. Bei Bedarf erfolgte dann lediglich eine Ergänzung durch Frischwasser.

Vor Inbetriebnahme der Versuchsanlage wurde eine Sichtkontrolle und eine Überprüfung der Prozesssteuerung hinsichtlich der eingestellten Prozessparameter sowie möglicher Fehlermeldungen durchgeführt. Zur Inbetriebnahme der Versuchsanlage wurden zunächst die Pumpen des Prozesswasser- und Wasseraufbereitungskreislaufes angefahren, gefolgt von der Nasssetzmaschine und den Entwässerungssieben. Im Leerlaufbetrieb erfolgte anschließend die Regulierung der Aufstromwassermenge mittels Flachschieber und bei Bedarf die Ergänzung des Wasserbedarfes durch Frischwasser.

Das Abfallmaterial wurde aus dem Zwischenlager mittels Radlager angeliefert, für weitere Untersuchungen beprobt, verwogen und für die Beschickung der Setzmaschine bereit gestellt.

Versuchsdurchführung

Die Phase der Versuchsdurchführung beschreibt den Zeitraum zwischen der ersten Materialaufgabe bis zu dem Zeitpunkt, an dem kein Leichtgutaustrag mehr aus der Versuchsanlage ausgetragen wurde. Für die Prozessüberwachung wurden die Zählerstände vor und nach dem Versuch zur Ermittlung der Energieverbräuche sowie die zeitliche Dauer des Versuches aufgenommen. Des Weiteren erfolgte eine Beprobung des Prozesswasserkreislaufes unmittelbar vor und nach der Versuchsdurchführung.

Eine automatische Beschickung der Nasssetzmaschine, zum Beispiel mittels Förderband, war aufgrund begrenzter Platzverhältnisse nicht möglich. Die Beschickung erfolgte daher manuell, indem die Abfälle in Chargen von ca. 30 l in die Materialaufgabe gegeben wurden. Eine kontinuierliche Beschickung begünstigt die gleichmäßigen Ausbildung des Setzbettes beziehungsweise die Sortiergüte. Dies konnte mit der angewandten Methodik sichergestellt werden.

Während der Versuchsdurchführung bedarf es einer permanenten Überwachung der Prozesssteuerung, der bedarfsgerechten Zuführung von Frischwasser in den Prozesswasserkreislauf und der Füllstandsüberwachung der Auffangbehälter für die Austragsgüter.

Versuchsnachbereitung

Die Versuchsanlage wurde nach den Versuchsdurchführungen über eine Dauer von mindestens einer Stunde im Nachlauf betrieben, da der Austrag des Feingutes mittels Zyklon zeitverzögert zu dem Schwergut- und Leichtgutaustrag erfolgte. Damit war gewährleistet, dass feinkörnige Komponenten weitgehend aus der Versuchsanlage ausgetragen wurden und Sedimentationsvorgänge in den Aggregaten, die zu Betriebsstörungen führen können, konnten reduziert werden. Die Sammlung des Feingutaustrages wurde zu dem Zeitpunkt beendet, an dem keine nennenswerten Mengen an Feststoff durch den Zyklon mehr ausgetragen wurden. Die Beurteilung dieses Abbruchkriteriums erfolgt dabei nach Augenschein anhand der Trübung des Feingutaustrages. Außerdem wurde das nach Versuchsende auf dem Setzbett verbliebene Schwergut manuell ausgetragen.

Im Rahmen der Versuchsnachbereitung erfolgte weiterhin die Beprobung, Verwiegung und Abfüllung der Austragsüter in Big-Bags als Rückstellproben. Die Lagerung erfolgte auf dem Gelände des Entsorgungszentrums.

Der Prozesswasserkreislauf wurde mittels Tauchpumpen beziehungsweise über den Bodenablass des Pumpenvorlagebehälters entleert, sofern das Prozesswasser nicht für weitere Versuchsdurchführungen verwendet werden sollte. Die Versuchsanlage wurde abschließend gereinigt.

3.2.4 Versuchsvarianten

Behandelt wurden im Laufe der Versuchsdurchführungen Deponate mit dem Siebschnitt < 25 mm, < 60 mm und 10 - 60 mm, wobei pro Versuchsvariante zwischen 384 kg und 827 kg Frischmaterial verarbeitet wurden. Einen Überblick über die Versuche und das dabei verwendete Aufgabegut liefert Tabelle 3-2. Während der Versuchsdurchführungen am 13.05.2014 und 20.05.2014 traten Komplikationen im Bereich der Prozesswasseraufbereitung auf, so dass die Ergebnisse beider Versuche im Rahmen der Massenbilanzierung verworfen werden mussten (Anlage 8-16).

Tabelle 3-2: Versuchsdurchführungen und verwendetes Material

Datum	Bemerkung	Material	Art des Prozesswassers
26.02.2014	Inbetriebnahme der Versuchsanlage	< 25 mm	FW
06.03.2014	1. Versuchsdurchführung	< 25 mm	BW
11.03.2014	2. Versuchsdurchführung	< 25 mm	BW
18.03.2014	3. Versuchsdurchführung	< 25 mm	FW
25.03.2014	4. Versuchsdurchführung	< 25 mm	BW
01.04.2014	5 + 6. Versuchsdurchführung	< 25 mm	FW + BW
02.04.2014	7. Versuchsdurchführung	< 25 mm	FW
08.04.2014	8. Versuchsdurchführung	< 25 mm	BW
15.04.2014	9. Versuchsdurchführung	< 60 mm	FW
07.05.2014	10 + 11. Versuchsdurchführung	< 60 mm	FW + FW
08.05.2014	12 + 13. Versuchsdurchführung	< 60 mm	BW + FW
13.05.2014	14. Versuchsdurchführung	< 60 mm	FW
20.05.2014	15. Versuchsdurchführung	< 60 mm	FW
21.05.2014	16. Versuchsdurchführung	< 60 mm	FW
27.05.2014	17. Versuchsdurchführung	10 - 60 mm	FW

FW = Frischwasser (entspricht Nutzwasser)

BW = zur nassmechanischen Aufbereitung von Deponat verwendetes Prozesswasser aus der vorangegangenen Versuchsdurchführung

3.3 Prozessbewertung

Die Bilanzierung von Massen- und Energieflüssen stellt die Grundlage für die Bewertung von Prozessen dar. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse können Rückschlüsse in Hinblick auf die Leistungsfähigkeit des betrachteten Prozesses gezogen und entsprechende Optimierungspotenziale abgeleitet werden. Durch die Ermittlung spezifischer Kenngrößen ist weiterhin eine Prozessbewertung in Form einer Gegenüberstellung mit vergleichbaren Prozessen möglich. Die im Rahmen dieser Arbeit aufgestellten Massenbilanzen bilden weiterhin die Grundlage für die ökonomische und ökologische Bewertung des Aufbereitungsprozesses.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin, die nassmechanische Aufbereitung hinsichtlich der Anwendbarkeit bei Deponaten zu bewerten. Der Fokus lag dabei zunächst auf der Erzeugung verwertbarer Stoffströme aus der Feinfraktion des Deponates, insbesondere einer mineralischen Fraktion, die als Baustoff eingesetzt werden kann.

Massenbilanz

Aus dem eingesetzten Aufbereitungsverfahren und der Zusammensetzung des Aufgabegutes ergeben sich folgende Austragsströme:

- Schwergutaustrag zur stofflichen Verwertung,
- Feingutaustrag zur stofflichen Verwertung,
- Leichtgutaustrag zur energetischen Verwertung,
- Feststoff im Prozesswasser als Reststoff.

Die Gesamtmassen der drei Austragsströme wurden nach jeder Versuchsdurchführung direkt vor Ort durch Wägung ermittelt. Zur Bestimmung des Feststoffgehaltes im Prozesswasser wurde unmittelbar nach Beendigung der Versuchsdurchführung eine Prozesswasserprobe aus dem Pumpenvorlagebehälter entnommen.

Die Bilanz der Input- und Output-Massenströme auf Basis der Trockensubstanzgehalte ergab im Mittel eine Abweichung von ca. -5,4 % des Austrages gegenüber dem Aufgabegut. Ursache hierfür ist die Inhomogenität der stofflichen Zusammensetzungen der einzelnen Stoffströme sowie die stark variierenden Wassergehalte. Eine weitere Fehlerquelle stellt die Bestimmung des Feststoffgehaltes im Prozesswasser dar, da Sedimentationsvorgänge während der Probennahme nicht vollständig ausgeschlossen werden konnten. Weiterhin erfolgt die Bestimmung der Feststoffmasse im Prozesswasser über das Gesamtvolumen des Prozesswassers, welches jedoch nicht ermittelt, sondern zu 1,5 m³ angenommen wurde.

Zur Vereinfachung der nachfolgenden Betrachtungen werden die ermittelten Abweichungen vernachlässigt und die Massenbilanzen auf Basis der Austragsströme gemäß der nachfolgenden Formel 3-1 ermittelt.

$$m_A = m_S + m_L + m_F + m_{FP} \quad \text{Formel 3-1}$$

m_A = Gesamtmasse des Aufgabegutes [Mg TS]

m_S = Gesamtmasse des Schwergutaustrages [Mg TS]

m_L = Gesamtmasse des Leichtgutaustrages [Mg TS]

m_F = Gesamtmasse des Feingutaustrages [Mg TS]

m_{FP} = Gesamtmasse des Feststoffes im Prozesswasser [Mg TS]

Sortiererfolg

Zur überschlägigen Bewertung der Sortierbarkeit des Aufgabegutes mittels Setzbetttechnik wird in der Literatur oft der Sortierbarkeitsindex nach Taggart (1951), zitiert nach Schubert (1996), herangezogen (s. Formel 3-2). Dabei gilt, dass mit zunehmender Dichtedifferenz der zu trennenden Güter im Aufgabegut der Sortiererfolg steigt. Beeinflusst wird der Sortiererfolg durch die Partikelgrößenverteilung, die mittlere Partikelgröße des Aufgabegutes sowie der Partikelform und Porosität.

$$q = \frac{\rho_S - \rho}{\rho_L - \rho} \quad \text{Formel 3-2}$$

q = Sortierbarkeitsindex [-]

ρ_S = Dichte der spezifisch schwereren Komponente [Mg/m^3]

ρ_L = Dichte der spezifisch leichteren Komponente [Mg/m^3]

ρ = Dichte des Fluids [Mg/m^3]

Anhand des Sortierbarkeitsindex kann folgende Abschätzung vorgenommen werden:

- $q > 2,5$: Trennung bis zur Korngröße $\geq 100 \mu\text{m}$ möglich
- $q > 1,75$: Trennung bis zur Korngröße $\geq 200 \mu\text{m}$ möglich
- $q > 1,5$: Trennung bis zur Korngröße $\geq 1,5 \text{ mm}$ möglich
- $q > 1,25$: Trennung bei noch größerem Gut mit mäßigem Erfolg möglich
- $q < 1,25$: durch Setzen keine Trennung möglich

Die Bewertung des Sortiererfolges verfahrenstechnischer Aggregate erfolgt in der Regel mittels Komponentenbilanzen. Über das Verhältnis der Anteile an Wertstoffen im Austragsgut zum Aufgabegut kann die Wertstoffausbringung ermittelt werden (s. Formel 3-3).

$$R_{\text{Schwergut}} = \frac{m_{\text{Schwergut}} * c_{\text{Schwergut}}}{m_{\text{Aufgabegut}} * c_{\text{AufgabegutSchwergut}}} \quad \text{Formel 3-3}$$

Mit: R = Wertstoffausbringung für das Schwergut

$m_{\text{Schwergut}}$ = Masse des Schwergutstromes [Mg]

$c_{\text{Schwergut}}$ = Konzentration des Schwergutes im Schwergutstrom [Mg]

$m_{\text{Aufgabegut}}$ = Masse des Aufgabegutes [Mg]

$c_{\text{Aufgabegut, Schwergut}}$ = Konzentration des Schwergutes im Aufgabegut [Mg/Mg]

Durchsatz

In der Aufbereitungstechnik wird die Durchsatzleistung von Aggregaten in der Regel bezogen auf die Frischsubstanz in Mg/h angegeben. Im Rahmen der Versuchsdurchführungen wurde der Durchsatz der Versuchsanlage für jede Versuchsdurchführung anhand der Masse des Aufgabegutes als Frischsubstanz und der Versuchsdauer ermittelt.

Die Bestimmung des Materialdurchsatzes erfolgte im Rahmen der Prozessüberwachung und dient lediglich dem Vergleich mit Kennwerten aus der Literatur. Der Einfluss der Durchsatzleistung auf die Massenbilanz und Qualität der Austragsgüter wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet.

Spezifischer Durchsatz

Der Materialdurchsatz bezogen auf die Setzfläche der Setzmaschine ergibt den spezifischen Durchsatz. Der spezifische Durchsatz wird in Abhängigkeit von der Trennschärfe festgelegt und kann durch Transport- und Austragsverhältnisse beeinflusst werden (Schubert, 1996)

Die Bestimmung des spezifischen Durchsatzes erfolgte lediglich im Rahmen der Prozessüberwachung und dient dem Vergleich mit Kennwerten aus der Literatur. Eine Diskussion des spezifischen Durchsatzes zur Bewertung der Versuchsanlage ist nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

Energieverbrauch

Der Energieverbrauch der Versuchsanlage ergibt sich aus den Antriebsleistungen der Motoren der Nasssetzmaschine, den Entwässerungssieben und den Pumpen für die Wasserkreisläufe. Die Versuchsanlage konnte nur unter Volllast betrieben werden, der Gesamtenergieverbrauch der Versuchsanlage ist damit nicht direkt vom Materialdurchsatz abhängig und wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit als Bilanzgröße vernachlässigt.

Wasserverbrauch

Die Versuchsanlage verfügt über einen geschlossenen Prozesswasserkreislauf mit konstanter Wassermenge. Die Menge an zugeführtem Frischwasser in Form von Ergänzungswasser ist dabei zu vernachlässigen. Das eingesetzte Prozesswasser stellt im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine Bilanzgröße dar.

3.4 Mess- und Analysemethoden zur Produkt- und Stoffstrombewertung

3.4.1 Probenahme- Lagerung und Aufbereitung

Die Entnahme des Probenmaterials erfolgte in Anlehnung an die „Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen“ (LAGA PN 98, 2002). Die Proben wurden direkt nach den Versuchsdurchführungen stichprobenartig aus den erzeugten Austragsgütern, aus frei lagernden Haufwerken beziehungsweise den Auffangbehältern entnommen. Die entnommenen Proben wurden gekennzeichnet, verschlossen und bis zur Analyse bei Raumtemperatur gelagert. In Vorbereitung auf die Versuchsdurchführungen wurden die Materialeigenschaften des Aufgabegutes ermittelt (Kapitel 4.1). Dieses wies eine vernachlässigbare biologische Aktivität

auf, weshalb auf eine Konservierung sämtlicher Materialproben verzichtet werden konnte. Alle Austragsgüter wurden in Big Bags auf dem Gelände des Entsorgungszentrums als Rückstellproben gelagert (Kapitel 3.2.3).

3.4.2 Siebanalysen

Die Siebanalysen wurden mit Frischmaterial sowie als Nass- und auch Trockensiebung in Anlehnung an die DIN 18123 durchgeführt.

Die Siebanalysen erfolgten mittels Rüttelsieb und Maschenweiten von 60 mm, 40 mm, 20 mm und 10 mm.

Weiterhin wurde ein Siebturm der Firma Retsch verwendet. Hierbei kamen die Maschenweiten 31,5 mm; 20 mm; 16 mm; 12,5 mm; 8 mm; 5 mm; 2 mm; 1 mm, 0,5 mm; 0,2 mm; 0,16 mm; 0,1 mm; 0,063 mm; 0,032 mm; und 0,02 mm zum Einsatz.

Die Ermittlung der Korngrößenverteilung feinkörniger Partikel kleiner 0,125 mm erfolgte durch Sedimentation mittels Aräometer-Verfahren gemäß DIN 18123.

3.4.3 Standardisierte Mess- und Analysemethoden

Die Probenmaterialien wurden vor und nach der nassmechanischen Behandlung auf Inhaltsstoffe analysiert. Die untersuchten Feststoffparameter sowie die zugehörigen Bestimmungsmethoden sind in der Anlage 8-8 zusammengefasst.

Neben der Feststoffanalyse war die Untersuchung von Eluatparametern erforderlich (siehe Anlage 8-9). Die Eluatherstellung erfolgte in Anlehnung an die DIN EN 12457-4. Insbesondere der Schwergutaustrag wies hohe Anteile nicht zerkleinerbarer Stoffe wie beispielsweise Metalle auf. Auf eine Partikelgrößenreduzierung < 10 mm beziehungsweise das Aussortieren nicht zerkleinerbarer Stoffe, gemäß DIN EN 12457-4, wurde aus Gründen der Vereinfachung und zur besseren Vergleichbarkeit generell verzichtet.

Nährstoffgehalte/ Zusammensetzung organischer Substanz

Die Ermittlung der Nährstoffgehalte sowie die Bestimmung der Zusammensetzung der organischen Bestandteile mittels Van-Soest-Analyse erfolgte gemäß Anlage 8-10.

Je Schurf wurde eine Mischprobe der Fraktion < 60 mm aus dem Zwischenlager entnommen und hinsichtlich des Nährstoffgehaltes analysiert.

Umweltrelevante Anforderungen

Die Analysen der umweltrelevanten Parameter nach den Kriterien der LAGA M 20 (Bauschutt) erfolgte für ausgewählte Proben (Tabelle 3-3).

Tabelle 3-3: Probenplan zur Analyse umweltrelevanter Parameter nach LAGA M 20

Versuchsdurchführung	Material	Aufgabegut	Schwergut-austrag	Feingut-austrag	Leichtgut-austrag	Schwergut aus Aufgabegut
18.3.14	< 25 mm		x	x		
1.4.14	< 25 mm		x	x		
8.4.14	< 25 mm		x	x		
15.4.14	< 60 mm		x	x		
7.5.14	< 60 mm		x	x		
8.5.14	< 60 mm		x			
27.5.14	10 - 60 mm	x	x	x	x	
Mischprobe	< 25 mm	3 x	x		3 x	3 x
Mischprobe	< 60 mm	3 x			3 x	2 x
Mischprobe	10 - 60 mm		3 x			

bautechnische Parameter

Die Analyse der bautechnischen Eigenschaften für die Anwendung der erzeugten mineralischen Stoffströme Schwergut- und Feingutaustrag im Straßen- und Erbau erfolgten nach den Kriterien der TL-Gestein (Anlage 8-11). Es wurde das Schwergut der Fraktion 10 - 60 mm aus der Versuchsdurchführung vom 27.05.2014 analysiert. Die Untersuchung des Feingutaustrages erfolgte anhand einer Mischprobe aus unterschiedlichen Versuchsdurchführungen stammend.

Energetische Verwertung

Die Analyse der verbrennungstechnischen Eigenschaften des Leichtgutaustrages und der Feinfraktion < 10 mm aus dem Deponat erfolgte nach den Kriterien für Sekundärbrennstoffe (RAL-GZ 724, 2012) nach Bundesgütesicherung. Analysiert wurde der Leichtgutaustrag der Fraktion 10 - 60 mm aus der Versuchsdurchführung vom 27.05.2014. Weiterhin wurden drei Mischproben aus den Rückstellproben des Leichtgutaustrages < 60 mm aus verschiedenen Versuchsdurchführungen erzeugt und einer Analyse zugeführt. Die Fraktion < 10 mm wurde zuvor mittels Rüttelsieb abgetrennt und beseitigt. Das Probenmaterial zur Bewertung der thermischen Verwertbarkeit der Fraktion < 10 mm aus dem Aufgabegut entstammt einer Mischprobe, hergestellt aus den Rückstellproben verschiedener Versuchsdurchführungen mit dem Aufgabegut < 60 mm. Die Abtrennung der Fraktion < 10 mm erfolgte dabei mittels Rüttelsieb.

Wiederablagerung

Die Analyse der Fraktion < 10 mm aus dem Deponat zur Beurteilung der Wiederablagerung erfolgten gemäß den Anforderungen nach Deponieverordnung (2016). Aus einer Mischprobe

des Aufgabeguts < 60 mm wurde die Teilfraktion < 10 mm abgesiebt und analysiert. Das Deponat < 60 mm wurde im Rahmen der Rückbaumaßnahme durch den Abfallentsorgungsbetrieb des Kreises Minden-Lübbecke (AML) analysiert.

Asbest

Die Untersuchung von Materialproben auf Asbest erfolgte mittels Rasterelektronen-mikroskopie, gemäß der VDI-Richtlinie 3855-Blatt 5. Die Analyse erfolgte an einer Mischprobe des Feingutaustrages aus der nassmechanischen Aufbereitung sowie an einer Mischprobe der Fraktion < 10 mm aus dem Aufgabegut.

3.4.4 Erweiterte Stoffstromaufbereitung

Die Bestimmung der Massenanteile der Anhaftungen des Aufgabegutes 10 - 60 mm sowie den entsprechenden Produktströmen Schwergut- und Feingutaustrag erfolgte mittels Elutionsverfahren in Anlehnung an die DIN EN 12457-4. Das Aufgabegut sowie der Schwergutaustrag wurde dazu im Verhältnis von 100 g Frischsubstanz zu 400 ml destilliertem Wasser für 24 h im Überkopfschüttler gewaschen. Aufgrund des hohen Volumenbedarfes des Leichtgutaustrages erfolgte die Wäsche mit einer Einwaage von 100 g Frischsubstanz und 800 ml destilliertem Wasser. Die Trennung der festen und flüssigen Phase nach dem Waschvorgang erfolgte mittels 1 mm Sieb. Der Feststoffgehalt in der flüssigen Phase stellt den Massenanteil der eluierbaren Anhaftungen dar. Der Feststoffanteil im Waschwasser wurde durch Druckfiltration bei 45 µm als Filterkuchen und anschließender Trocknung beziehungsweise durch Verdampfung als Trockenrückstand, bestimmt.

3.5 Ökonomische Betrachtungen

Angewandt wird die Annuitätenmethode, eine dynamische Investitionsrechnung aufbauend auf der Kapitalwertmethode. Die Berechnung des Annuitätenfaktors erfolgt gemäß Formel 3-4.

$$Af_{i,n} = [(1 + i)^n * i] / [(1 + i)^n - 1] \quad \text{Formel 3-4}$$

i = Zinssatz

n = Laufzeit

Af = Annuitätenfaktor

3.6 Ökologische Bewertung

Zur Bewertung der Umweltauswirkungen des Aufbereitungsprozesses wurde eine ökobilanzielle Betrachtung gemäß den Anforderungen nach DIN EN ISO 14040 (2012) und DIN EN ISO 14044 (2006) durchgeführt.

Im Rahmen der Sachbilanzierung erfolgt die Quantifizierung der In- und Outputströme ausgehend von der verbrauchten Energie, dem Betriebsmitteleinsatz sowie den erzeugten Produkten, Abfällen und Emissionen, bezogen auf die funktionale Einheit innerhalb eines definierten Bilanzrahmens (Abbildung 5-1). Eine Übersicht zu den in der ökobilanziellen Betrachtung berücksichtigten Stoffströme liefert Tabelle 3-4.

Zurückgegriffen wurde im Zuge der Datenerhebung auf die Datenbank des vom Internationalen Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und- strategien entwickelten „Globalen Emissionsmodells integrierter Systeme“ (GEMIS, Version 4.9) sowie auf die vom Swiss Centre for Life Cycle Inventories entwickelte ecoinvent- Datenbank (Version 2.2). Die Verrechnung der Daten zur Wirkungsabschätzung erfolgte mittels Microsoft-Excel (Version Office 2016).

Tabelle 3-4: Stoffströme der nassmechanischen Aufbereitung

Input	Output
<ul style="list-style-type: none"> • Elektrische Energie • Prozesswasser • Aufgabegut 	<ul style="list-style-type: none"> • Emissionen • Abwasser • Schwergutaustrag • Feingutaustrag • Leichtgutaustrag • Reststoffe

Versauerungspotenzial

Die Wirkkategorie Versauerungspotenzial berücksichtigt die Versauerung von terrestrischen oder aquatischen Systemen, was zu einer Störung des chemischen Gleichgewichtes dieser Systeme führt. Die Angabe der Wirkkategorie erfolgt durch Addition der Einzelemissionen, gewichtet nach ihrem Versauerungspotenzial, in Bezug auf die Basisgröße Schwefeldioxid als SO₂- Äquivalente. Der Kategorie Versauerungspotenzial wird innerhalb der ökobilanziellen Betrachtung die Bedeutung „hoch“ zugeordnet (Krüger et al., 2016).

Treibhauspotenzial

Die Wirkkategorie Treibhauseffekt berücksichtigt die Freisetzung klimarelevanter Emissionen. Die Angabe der Wirkkategorie erfolgt durch Addition der Einzelemissionen, gewichtet nach ihrem Treibhauspotenzial in Bezug auf die Basisgröße Kohlenstoffdioxid als CO₂- Äquivalente. Der Kategorie Treibhauseffekt wird innerhalb der ökobilanziellen Betrachtung die Bedeutung „sehr hoch“ zugeordnet.

Kumulierter fossiler Energieaufwand (KEA-fossil)

Die Wirkkategorie kumulierter fossiler Energieaufwand berücksichtigt als Summenparameter alle Energieaufwendungen innerhalb der Bilanzgrenzen. Er gibt als energetische Größe Aufschluss über den Gesamtenergieverbrauch und wird in MJ-Äquivalenten angegeben. Der Kategorie KEA-fossil wird innerhalb der ökobilanziellen Betrachtung die Bedeutung „mittel“ zugeordnet.

3.7 Statistische Auswertung

Die Darstellung einzelner Versuchsergebnisse erfolgte in Form des Medianwertes unter Angabe der Stichprobenzahl, des 25% und 75% Quantils sowie dem Minimum und Maximum. Als Ausreißerkriterium wurde das 1,5- fache des Interquartilsabstandes verwendet. Die Auswertung und Darstellung der Versuchsergebnisse erfolgte mit dem Programm Origin Pro 2015.

Im Rahmen der Versuchsdurchführungen wurden keine Messreihen zur Darstellung von Zusammenhängen verschiedener Sachverhalte durchgeführt, weshalb Regressionsanalysen im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine Anwendung fanden.

4 Ergebnisse und Auswertung

4.1 Charakterisierung des rückgebauten Deponates

Ziel der nassmechanischen Aufbereitung der Feinfraction < 60 mm ist die Erzeugung verwertbarer Stoffströme. Mit Hilfe von Qualitätskennwerten werden die Austragsgüter bewertet und Rückschlüsse auf die Wirkung der eingesetzten Aufbereitungstechnik gezogen. Vor dem Hintergrund der Prozessanalysen und -bewertung wird zunächst das gesamte rückgebaute Deponat beschrieben.

4.1.1 Korngrößenverteilung und stoffliche Zusammensetzung - Gesamtfraction des Rückbaugutes

Zur Ermittlung der Partikelgrößenverteilung des Deponates wurden vor der Vorkonditionierung Siebanalysen (Abbildung 4-1) und für die jeweiligen Siebfractionen umfangreiche Stoffanalysen durchgeführt (Abbildung 4-4).

Die überwiegend aus Mineralstoffen bestehende Feinfraction < 60 mm nimmt am Gesamtdeponat einen Massenanteil zwischen 60 % und 70 % ein. Knapp 50 % stellt die Fraction < 20 mm. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Wassergehalt des Siebgutes die Siebgüte beeinflusst (siehe auch Tabelle 4-1). Feine Partikel und bindige Bodenanteile aber auch feinkörnige Oberflächenanhaftungen werden nur unzureichend bzw. fehlerhaft abgebildet. Gegenüber der Siebung von Frischmaterial weist die Nass- und Trockensiebung erhöhte Feinanteile ab einer Partikelgröße von 10 mm auf (Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3). Der tatsächliche Anteil feinkörniger Materialien im frischen rückgebauten Deponat fällt somit insgesamt höher aus. Die Glühverlustanalysen zeigen, dass die Feinfraction < 60 mm vorwiegend aus mineralischen Komponenten besteht (Abbildung 4-7).

Die zweitgrößte Fraction stellt die Fraction Kunststoffe, gefolgt von der Fraction Holz. Beide Fractionen unterliegen während des Einbaus und der Deponierung kaum quantitativen Veränderungen. Die beide Fractionen bilden den Hauptteil der heizwertreichen Fraction, die 27 bis 32 % umfasst (Abbildung 4-9).

Der Anteil an Metallen fällt für das Gesamtdeponat mit Werten von 2,5 % bzw. 4,6 % vergleichsweise hoch aus.

Abfallfractionen wie Bioabfälle, PPK und Hygieneartikel sind nur in sehr geringen Mengen wiederfindbar. Zurückzuführen ist dies auf die schon oben genannten biologischen Abbauprozesse während der Deponierung, die einen Großteil der anaerob abbaubaren organischen Abfallfractionen mineralisieren und diese in die Kornfractionen < 20 mm überführen.

Ein Zusammenhang zwischen dem Alter des Deponates und der stofflichen Zusammensetzung, beispielsweise durch die Auswirkung abfallwirtschaftlicher Maßnahmen ist schwer herauszuarbeiten. Begründet ist dies vor Allem in den stofflichen Veränderungen des Deponates, die während des Deponierungszeitraumes stattgefunden haben. Anaerobprozesse bauen Teile der Fraktionen Bioabfälle, PPK und Hygieneartikel ab. Mechanische Beanspruchungen überführen Teile der Glasfraktion in die nicht weiter differenzierte Feinfraktion < 20 mm. Teile der Fe-Fraktion unterliegen qualitativen und quantitativen Veränderungen durch korrosive Prozesse.

Das untersuchte Deponat fällt bezüglich seiner Zusammensetzung in den Wertebereich anderer Rückbauprojekte (Van Vossen und Prent, 2011). Abbildung 4-5 zeigt zum Vergleich die mittlere Abfallzusammensetzung, wie sie in bereits durchgeführten Rückbauprojekten ermittelt wurde. Ein direkter Vergleich von Daten aus Sortieranalysen mit Literaturwerten ist jedoch schwierig, da es hinsichtlich der Durchführung von Sortieranalysen keine einheitlichen Vorgaben in Bezug auf die zu ermittelnden Stoffgruppen gibt, beziehungsweise mit unterschiedlichen Siebschnitten oder Siebverfahren gearbeitet wird (Münnich et al., 2015).

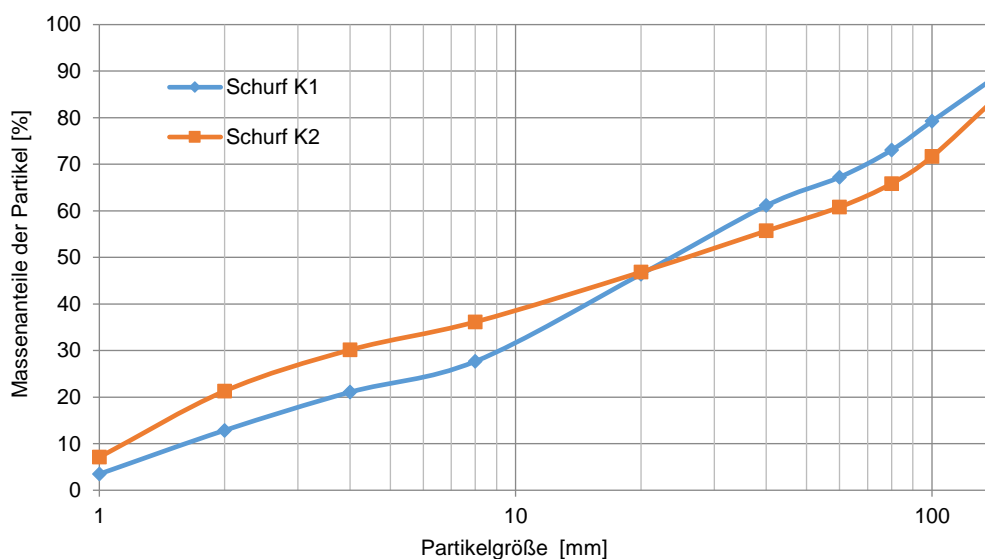


Abbildung 4-1: Sieblinien des Deponats < 140 mm

Ergebnisse und Auswertung

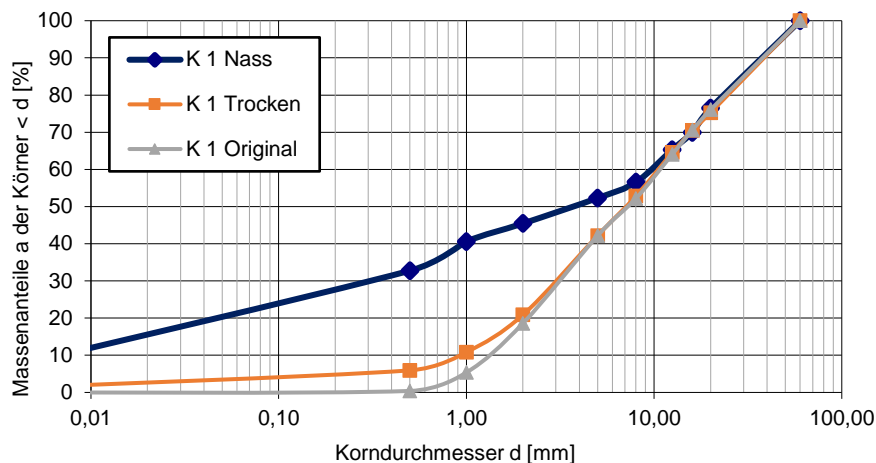


Abbildung 4-2: Frischmaterial, bezogen auf die Trockensubstanz (Feinmaterial < 60 mm, Schurf K 1)

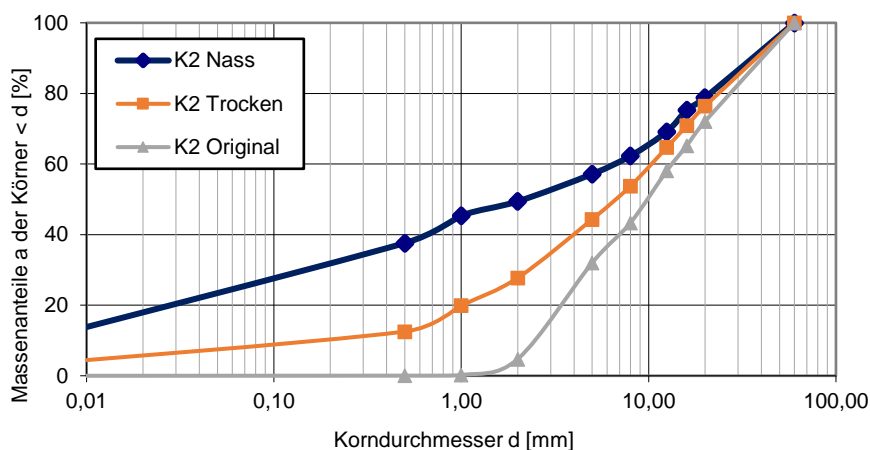
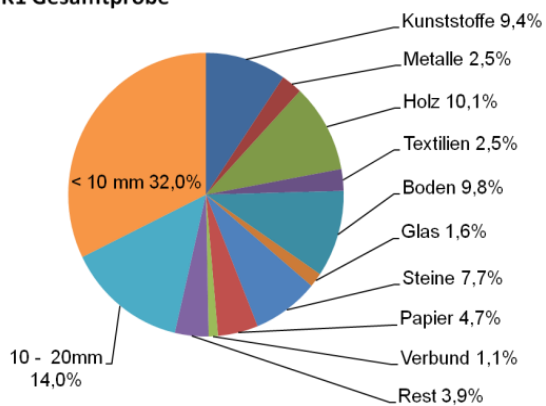


Abbildung 4-3: Sieblinie für Nass- und Trockensiebung gegenüber der Siebung mit Frischmaterial, bezogen auf die Trockensubstanz (Feinmaterial < 60 mm, Schurf K 2)

K1 Gesamtprobe



K2 Gesamtprobe

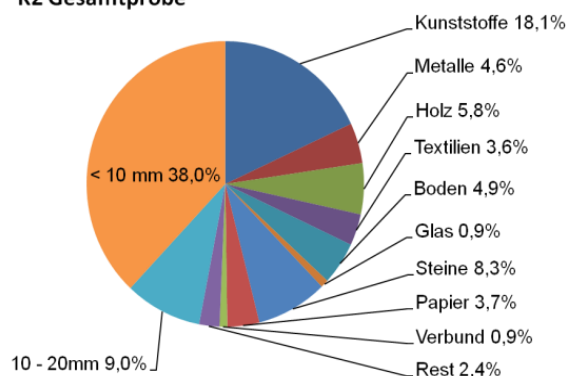


Abbildung 4-4: Stoffliche Zusammensetzung des Gesamtdeponates

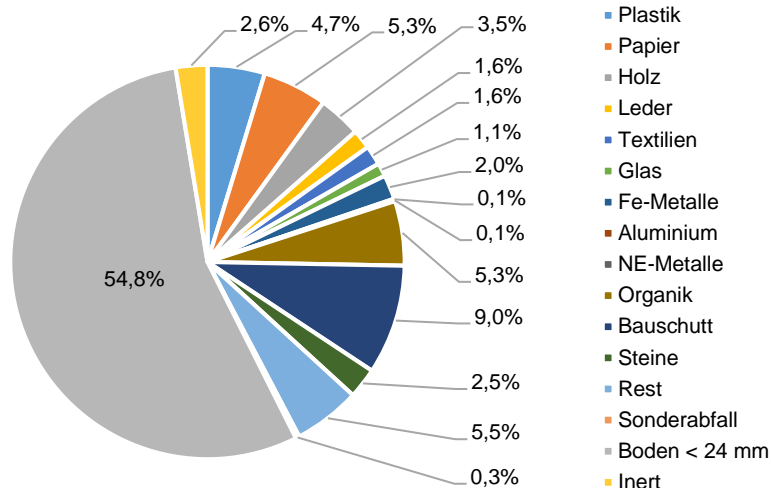


Abbildung 4-5: Mittlere Deponatzusammensetzung aus 60 Rückbauprojekten (Van Vossen und Prent, 2011)

4.1.2 Korngrößenverteilung und stoffliche Zusammensetzung - Feinfraktion < 60 mm des Rückbaugutes

Die Feinfraktion < 60 mm mit einem Massenanteil am Gesamtdeponat von 60 % und 70 % (s.o.) ist ein stofflich inhomogenes Gemisch mit einem hohen Anteil bodenähnlicher Bestandteile und starken Verschmutzungen der Partikeloberflächen (Abbildung 4-6). Einen visuellen Eindruck der einzelnen Aufgabe und Austragsgüter vermittelt Anlage 8-17 ff.

Erwartungsgemäß weisen die Trockensubstanzgehalt (TS), die Glühverluste (GV) sowie der Gehalt an Gesamtkohlenstoff im Feststoff (TOC) große Wertebereiche auf (Tabelle 4-1). Detaillierte Aussagen zu den TOC- und Glühverlustwerten finden sich in den nachfolgenden themenspezifischen Kapiteln.

Die Glühverlustanalysen zeigen, dass die Feinfraktion < 60 mm vorwiegend aus mineralischen Komponenten besteht (Abbildung 4-7). Tendenziell sinkt der Glühverlust mit abnehmenden Kornfraktion. Innerhalb der Feinfraktion < 60 mm stellt die Kornfraktion < 20 mm mengenmäßig den größten Anteil. Sie besteht vorwiegend aus bodenähnlichen, mineralstoffreichen Komponenten. Zurückzuführen ist der hohe Feinkorn- und Mineralstoffanteil u.a. auf die während der Deponierung stattgefundenen biologischen Abbauprozesse und der damit zusammenhängenden relativen Aufkonzentration der Mineralik. Auch die mechanischen Beanspruchungen, denen das Deponieinventars ausgesetzt ist sowie die Verwendung mineralstoffreicher bodenähnlicher Zwischenabdeckungen sind Ursache der hohen Feinkorn- und Mineralstoffanteile.



Abbildung 4-6: Feinfraktion < 60 mm (Mischprobe)

Tabelle 4-1: Trockensubstanz-, Glühverlust- und TOC-Gehalte der Feinfraktion < 60 mm (Auszug)

Probenahme	K1			K2		
Datum	TS [%]	GV [%]	TOC [%]	TS [%]	GV [%]	TOC [%]
26.09.2013	66,7	25,88	11,8	76,78	22,23	9,2
17.10.2013	59,91	40,04	15,5	80,6	19,4	9
31.10.2013	72,54	27,46	15,2	77,93	22,07	8,1
12.11.2013	82,56	17,44	9,5	91,48	8,52	5
19.11.2013	67,31	32,69	17,8	80,96	19,04	10,4
12.12.2013	74,12	25,88	14,1	77,77	22,23	12,1

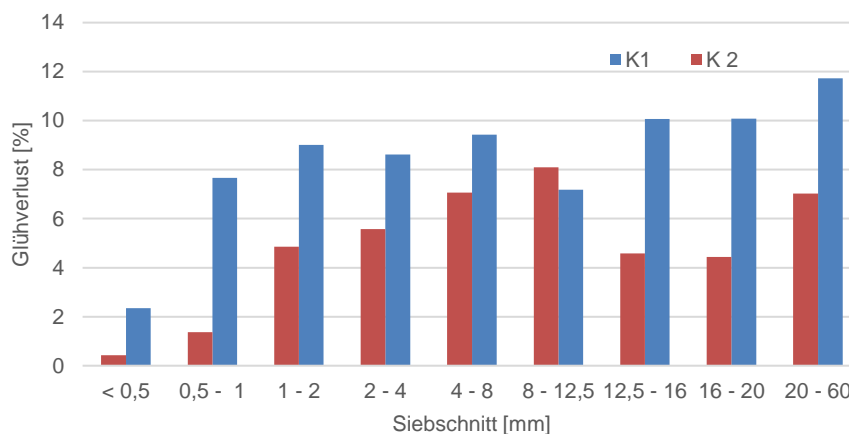


Abbildung 4-7: Glühverluste der Feinfraktion, unterteilt nach Kornfraktionen

Die heizwertreiche Fraktion, bestehend aus Kunststoffen, Holz, Textilien und Papier, weist in der Feinfraktion < 60 mm einen Massenanteil von knapp 10 % auf (Abbildung 4-8), dies entspricht einem Anteil von ca. 20 % der im Gesamtdeponat enthaltenen heizwertreichen Fraktion (Abbildung 4-9). Diese Ergebnisse liegen damit in der gleichen Größenordnung wie sie im Rahmen anderer Deponierückbaumaßnahmen ermittelt wurden (Gäth und Nispel, 2011).

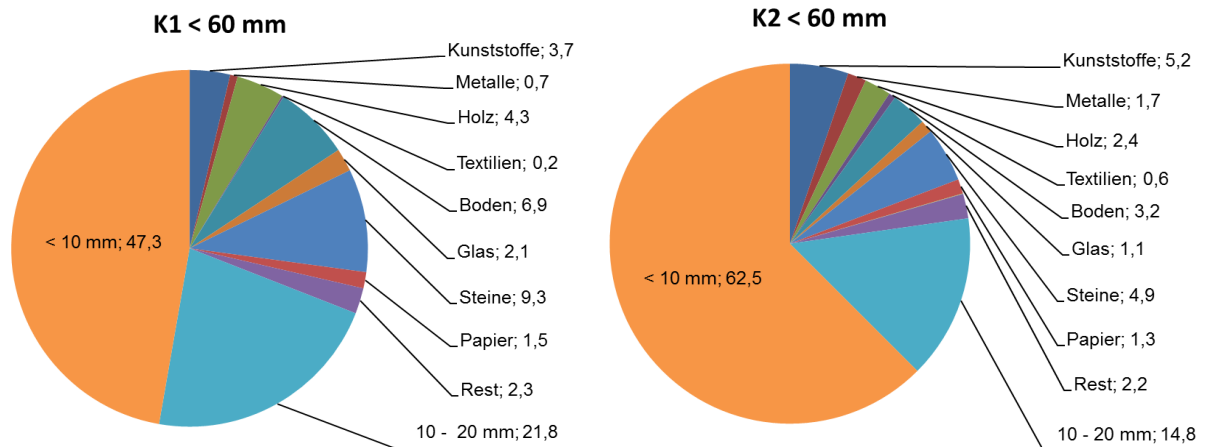


Abbildung 4-8: Stoffliche Zusammensetzung der Feinfraktion < 60 mm

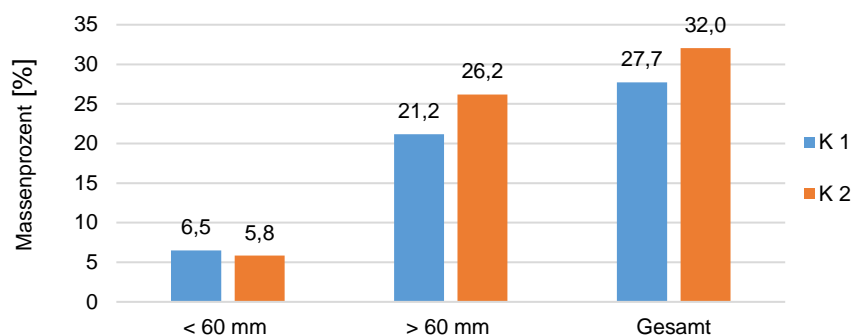


Abbildung 4-9: Verteilung der heizwertreichen Fraktion im Deponat

Werthaltige inerte Komponenten, die im Rahmen der Sortieranalyse erfasst werden konnten, stellen die Fraktionen Metalle, Glas und Steine dar. Der Anteil an Metallen fällt für die Feinfraktion < 60 mm mit Werten von 1,7% bzw. 0,7% gering aus. Auch die Glas- und Steinfraktionen kommen mit 1,1% bis 2,1%, bzw. mit 4,9% bis 9,3% nur in geringen Mengen vor. Künstliche Gesteinskörnungen wie z.B. Beton und Ziegel wurden im Rahmen der Sortieranalyse nicht ausgewiesen.

Die Abbildung 4-10 und Abbildung 4-11 stellen die Verteilung werthaltiger Stoffe für die Grobfraktion und Feinfraktion < 60 mm als Gesamtübersicht dar. Insgesamt weist die Grobfraktion erwartungsgemäß höhere Wertstoffgehalte, außer bei Glas und teilweise bei Steinen, im Vergleich zur Feinfraktion auf.

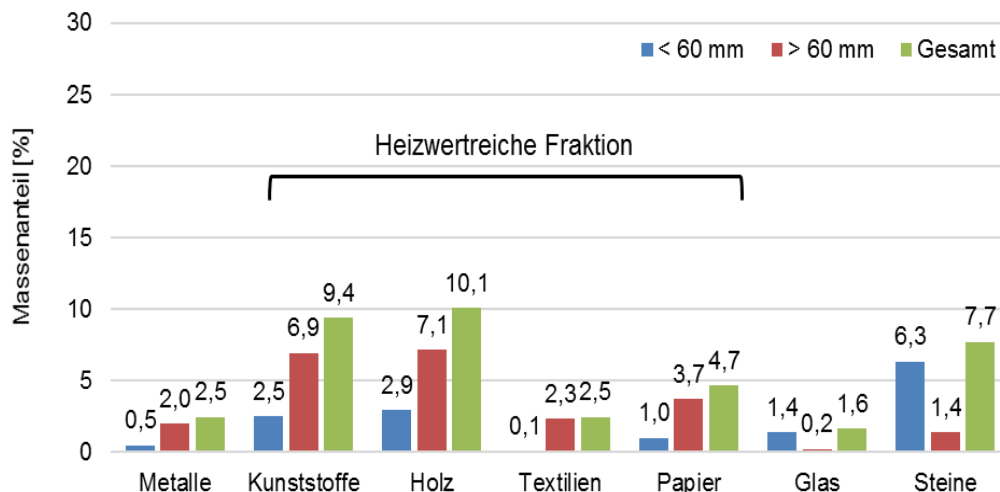


Abbildung 4-10: Werstoffanteile Schurf K 1, gewichtet nach Massenanteil

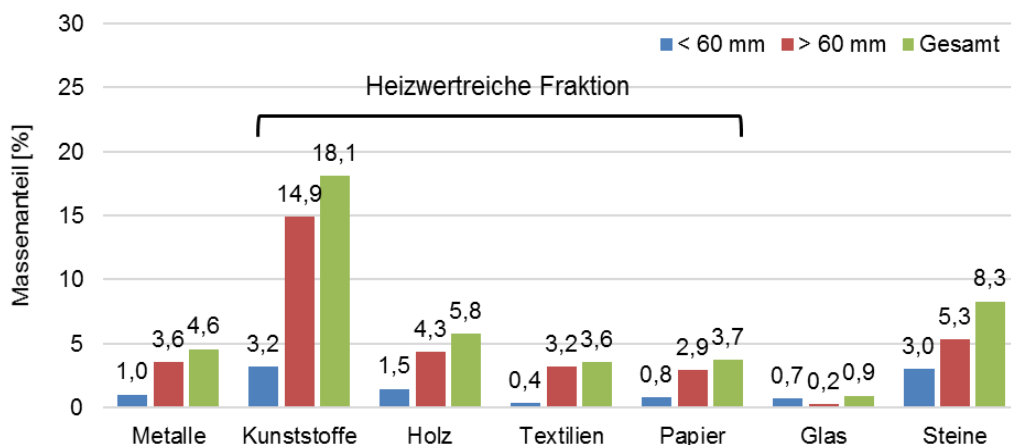


Abbildung 4-11: Werstoffanteile Schurf K 2, gewichtet nach Massenanteil

Die Feinfraktion < 60 mm enthält nur geringe Mengen an Düngestoffen (Tabelle 4-2), dies gilt insbesondere für die vergleichsweise knappe Ressource Phosphor. Generell gilt, dass eine wirtschaftliche Rückgewinnung nicht gegeben ist.

Tabelle 4-2: Nährstoffgehalte der Feinfraktion < 60 mm

Stoff	Einheit	K1	K2	Mittlere Nährstoffgehalte von Bioabfall
Stickstoff-Gesamt	Ma [%] TS	0,62	0,61	0,50- 2,7 ¹
NH ₄ -N	Ma [%] TS	0,0013	0,0011	0,05 - 0,2 ²
K ₂ O	mg/kg TS	0,24	0,29	2,2 ²
P ₂ O ₅	mg/kg TS	0,24	0,24	2 ¹
CaO	Ma [%]	3,28	2,92	-
MgO	Ma [%]	0,48	0,45	-

¹ (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2013)

² (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, 2007)

4.1.3 Biologische Aktivität und biologisches Abbaupotenzial

Neben der stofflichen Zusammensetzung wurde die Feinfraktion hinsichtlich der Ablagerungsparameter nach Deponieverordnung (DepV, 2016) und weiterer Parameter zur Kennzeichnung der organischen Substanz untersucht. Die Analyseergebnisse sind in Tabelle 4-3 zusammengestellt und den Grenzwerten der Deponieverordnung gegenübergestellt.

Tabelle 4-3: Biologische Qualitätskennwerte der Feinfraktion < 60 mm und Grenzwerte der DepV (2016)

Datum der Probenahme	Schurf	AT ₄	GB ₂₁ ¹	Selbst-erhitzung	pH- Wert	TOC	CSB	DOC	BSB ₅
		Feststoff			Eluat				
		[mg _{O2} /g _{TS}]	[NI/kg _{TS}]	[max. °C]	[-]	[%]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
26.09.2013	K1	1,44	0,5	-	7,8	11,8	148	37	21,5
	K2	1	0,11	-	7,7	9,2	124	31	16
17.10.2013	K1	0,94	0,18	20,4	7,3	11,2	139	30	10
	K2	0,44	0,24	20,2	7,4	15,5	102	23	7
31.10.2013	K1	0,66	0,41	-	7,8	19,0	176	48	8
	K2	0,44	0,08	-	7,7	15,2	125	33	8,6
12.11.2013	K1	0,99	-	22,3	7,4	9,5	114	32	0,9
	K2	0,33	-	19,9	7,8	5,0	94	25	-
19.11.2013	K1	0,72	-	20,5	7,1	17,8	112	31	0,2
	K2	0,55	-	19,5	7,3	10,4	91	17	1,6
12.12.2013	K1	0,49	1,01	17,7	7,3	15,3	147	38	1,4
	K2	0,29	0,36	17,5	7,4	14,1	111	22	1,1
Mittelwert	-	0,69	0,36	19,75	7,5	12,8	123	30,5	6,9
Grenzwert für DK II nach DepV, Tabelle 2									
		5	20	-	5,5 – 13	18	-	300	-

¹ Zusätzliche Untersuchungen im thermophilen Temperaturbereich erzeugten vergleichbare Gasbildungsraten wie im mesophilen Temperaturbereich

Die Feinfraktion weist eine nur sehr geringe biologische Restaktivität auf. Die Grenzwerte zur biologischen Aktivität wie GB₂₁, AT₄ und TOC_{Feststoff} werden deutlich unterschritten. Gleiches gilt bezüglich der Eluatwerte aus der DepV (siehe Kapitel 4.1.4). Eine biologische Behandlung der Feinfraktion ist vor dem Hintergrund einer möglichen Wiederablagerung auf Deponien nach DK II nicht erforderlich.

Die geringe biologische Aktivität des Feingutes deutet auf einen weitestgehend inerten Zustand hin. Die durchgeführten „van Soest Analysen“ zeigen, dass sich die organische Substanz vorwiegend aus schwer abbaubaren Komponenten wie Hemicellulosen, Cellulosen und Lignin zusammensetzt und somit anaeroben Abbauprozessen nicht zugänglich ist (Tabelle 4-4). Eine Gewinnung relevanter Biogasmengen durch die Vergärung der Feinfraktion < 60 mm ist somit nicht gegeben. Ebenso ist eine relevante Massenreduktion durch aerobe Abbauprozesse nicht zu erwarten.

Der Gehalt organischer Bestandteile sowie die biologische Aktivität der Feinfraktion ist mit Angaben aus der Literatur vergleichbar (DWA, 2012; Mönkare et al., 2016).

Tabelle 4-4: Zusammensetzung der enthaltenen organischer Substanz (Van-Soest-Analyse)

Stoffgruppe	Einheit	K1	K2
Rohprotein	Ma [%] FS	2,3	2
Rohfaser	Ma [%] FS	5,2	4,8
Zucker	Ma [%] FS	< 0,18	< 0,18
Stärke	Ma [%] FS	< 0,5	< 0,5
NDF (Hemicellulosen + Cellulosen + Lignin)	Ma [%] TS	9,8	8,3
ADF (Lignin + Cellulosen)	Ma [%] TS	11,8	11,3
ADL (Lignin)	Ma [%] TS	8	7

4.1.4 Schadstoffe im Eluat

Die Bestimmung der Schadstoffgehalte der Feinfraktion < 60 mm erfolgt über Eluatmessungen, deren Bewertung wird anhand der Ablagerungskriterien für mechanisch- biologisch vorbehandelte Abfälle (Deponieklasse DK II) gemäß DepV (2016) vorgenommen (Tabelle 4-5 und Tabelle 4-6). Insgesamt hält das Feinmaterial die Ablagerungskriterien für mechanisch-biologisch vorbehandeltem Abfall zu Deponierung ein.

Tabelle 4-5: Eluatwerte sowie extrahierbare lipophile Stoffe der Feinfraktion < 60 mm und Grenzwerte der DepV (2016) - Schurf K 1

Parameter nach DepV	Einheit	K 1				Grenzwerte DepV Anh. 3, Tab. 2, DK II, Sp. 7
		26.06.2013	03.07.2013	03.07.2013	25.07.2013	
1.Trockenrückstand (TS)	%	77,4	72,5	72,0	77,4	
2. organ. Anteil des TS der Originalsubstanz						
2.01. bestimmt als Glühverlust	Masse-%	44,0	22,4	25,4	35,3	5
2.02. bestimmt als Feststoff - TOC	Masse - %	16,2	8,9	14,4	6,4	18 Masse - %
3. extrahierbare lipophile Stoffe in OS	Masse - %	0,69	0,75	0,17	0,10	0,8 Masse - %

Parameter nach DepV	Einheit	K 1				Grenzwerte DepV Anh. 3, Tab. 2, DK II, Sp. 7
		26.06.2013	03.07.2013	03.07.2013	25.07.2013	
4. Eluat						
4.01. pH-Wert		8,1	8,1	8,4	7,9	5,5 - 13,0
4.02. Leitfähigkeit	µS / cm	1851	1170	1286	1338	50000 µS / cm
4.03. DOC	mg / l	73,5	29,5	37,1	27,6	300 mg / l
4.04. Phenole	mg / l	0,047	< 0,001	0,01	0,01	50 mg / l
4.05. Arsen	mg / l	0,005	0,002	0,002	0,004	0,5 mg / l
4.06. Blei	mg / l	0,006	<0,003	<0,003	<0,003	1 mg / l
4.07. Cadmium	mg / l	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,1 mg / l
4.08. Chrom - VI	mg / l	<0,01	<0,02	<0,02	<0,025	0,1 mg / l
4.09. Kupfer	mg / l	0,025	0,011	0,013	0,012	5 mg / l
4.10. Nickel	mg / l	0,083	0,025	0,041	0,050	1 mg / l
4.11. Quecksilber	mg / l	<0,005	<0,005	<0,005	<0,002	0,02 mg / l
4.12. Zink	mg / l	0,10	<0,02	0,05	0,05	5 mg / l
4.13. Fluorid	mg / l	0,23	0,33	0,28	0,4	25 mg / l
4.14. Ammonium-N	mg / l	55,7	30,2	35,5	22,6	200 mg / l
4.15. Cyanide, leicht freisetzbar	mg / l	< 0,1	< 0,005	< 0,005	<0,005	0,5 mg / l
4.16. AOX (Schüttel-methode)	mg / l	0,135	0,064	0,079	0,089	1,5 mg / l
4.17. Wasserlöslicher Anteil (Abdampfrückstand)	Masse - %	0,13	0,08	0,08	0,12	6 Masse - %
5. Biologische Abbaubarkeit der Originalsubstanz bezogen auf TS						
5.01. Atmungsaktivität (AT ₄)	mg / g	2,9	2,2	2,4	3,3	5 mg / g
5.02. Gasbildungsrate (GB ₂₁)	NI / kg TS	4,58	4,91	7,19	1,13	20 l / kg
6. 1 oberer Heizwert OS / TS	kJ / kg	7.259 / 9.985	2.966 / 4.046	4.587 / 6.312	2.740 / 3.876	6000 kJ / kg TS
6.2 unterer Heizwert OS / TS	kJ / kg	6.180 / 9.418	2.002 / 3.621	3.418 / 5.764	1.773 / 3.520	-

Tabelle 4-6: Ablagerungskriterien für Feinmaterial < 60 mm - Schurf K 2

Parameter nach DepV	Einheit	K 2			Grenzwerte
		15.07.2013	01.08.2013	01.08.2013	DepV Anh. 3, Tab. 2, DK II, Sp. 7
Trockenrückstand (TS)	%	73,2	63,3	73,2	
2. organ. Anteil des TS der Original-substanz					
2.01. bestimmt als Glühverlust	Masse-%	31,7	31,9	17,3	5
2.02. bestimmt als Feststoff - TOC	Masse - %	12,9	13,1	10,0	18 Masse - %
3. extrahierbare lipophile Stoffe in OS	Masse - %	0,93	0,42	0,19	0,8 Masse - %
4. Eluat:					
4.01. pH-Wert		7,4	8,1	8,1	5,5 - 13,0
4.02. Leitfähigkeit	µS / cm	2250	1392	1072	50000 µS / cm
4.03. DOC	mg / l	596	69,9	23,8	300 mg / l
4.04. Phenole	mg / l	0,88	<0,01	0,034	50 mg / l
4.05. Arsen	mg / l	0,002	0,006	0,002	0,5 mg / l
4.06. Blei	mg / l	<0,003	0,05	0,015	1 mg / l
4.07. Cadmium	mg / l	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,1 mg / l
4.08. Chrom - VI	mg / l	< 0,02	<0,1	<0,025	0,1 mg / l
4.09. Kupfer	mg / l	0,002	0,024	0,005	5 mg / l
4.10. Nickel	mg / l	0,074	0,088	0,033	1 mg / l
4.11. Quecksilber	mg / l	<0,002	<0,002	<0,002	0,02 mg / l
4.12. Zink	mg / l	<0,02	0,35	0,06	5 mg / l
4.13. Fluorid	mg / l	18,3	0,4	0,42	25 mg / l
4.14. Ammonium-N	mg / l	80	46,6	47,1	200 mg / l
4.15. Cyanide, leicht freisetzbar	mg / l	<0,005	<0,005	<0,005	0,5 mg / l
4.16. AOX (Schüttelme-thode)	mg / l	0,155	0,209	0,077	1,5 mg / l
4.17. Wasserlöslicher Anteil (Abdampf-rückstand)	Masse - %	0,2	0,12	0,1	6 Masse - %
5. Biologische Abbaubarkeit der Originalsubstanz bezogen auf TS					
5.01. Atmungsaktivität (AT ₄)	mg / g	9,2	4,1	4,4	5 mg / g
5.02. Gasbildungsrate (GB ₂₁)	NI / kg TS	42,78	2,13	0,27	20 l / kg
6. 1 oberer Heizwert OS / TS	kJ / kg	6.712/10.310	4.918 / 8.036	2.397 / 3.828	6000 kJ / kg TS
6.2 unterer Heizwert OS / TS	kJ / kg	5.394/9.659	3.604 / 7.436	< 1.500 / 3.461	-

4.1.5 Asbest

Mehrere Proben des rückgebauten Deponates wurden auf Asbest analysiert. Erste Untersuchungen erfolgten dabei bereits während der Probebohrungen im Rahmen des Arbeits- und Emissionsschutz zur Vorbereitung des Rückbaus durch die Ingenieurgruppe RUK GmbH, Stuttgart. Bei den entnommenen Proben konnte kein Asbest nachgewiesen werden. Unabhängig davon wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Mischprobe der Bodenfraktion < 10 mm und des Feingutaustrages analysiert, wobei ebenfalls kein Asbest nachgewiesen werden konnte.

4.1.6 Oberflächenanhaftungen

Eigene Untersuchungen sowie Angaben aus der Literatur belegen, dass die Oberflächen deponiebürtiger Stoffströme im Allgemeinen starke Verunreinigungen bzw. Anhaftungen aufweisen (Wiemer et al., 2009; Friedmann und Zollner, 1995; DWA, 2012; Zhou et al., 2014; Quaghebeur et al., 2013; Rotheut und Quicker, 2015). In Abhängigkeit von deren Qualität, können diese das Verfahren zur Aufbereitung des Deponates sowie die Produktqualität der erzeugten Stoffströme beeinträchtigen. Als Anhaftungen werden im Rahmen dieser Arbeit Partikel bezeichnet, die an den Oberflächen der Partikel > 8 mm anhaften und eine maximale Größe von 1 mm aufweisen.

Massenanteil der Anhaftungen

Tabelle 4-7 zeigt die Massenanteile der mit Wasser ablösbaren Anhaftungen des Aufgabegutes bei verschiedenen Korngrößenfraktionen. Unter Berücksichtigung der Massenanteile der einzelnen Siebschnitte beträgt der rechnerisch bestimmte Anteil der abwaschbaren Anhaftungen am Aufgabegut, für die Fraktion 8 – 60 mm, ca. 15 % bezogen auf die Trockensubstanz.

Tabelle 4-7: Massenanteil der Anhaftungen des Aufgabegutes

Korngrößenfraktion [mm]	Massenanteil der Anhaftungen [% TS]	Massenanteil der Fraktion [%]
31,5 - 60	11,9	25,38
20 - 31,5	14,3	27,97
16 - 20	15,5	13,45
12,5 - 16	19,6	13,78
8 - 12,5	17,8	19,42

Partikelgrößenverteilung der Anhaftungen

Die Ermittlung der Partikelgrößenverteilung der Anhaftungen erfolgte mittels Nasssiebung und für Kornanteile < 0,125 mm mittels Aräometerverfahren. Gemäß der Bodenklassifizierung nach DIN EN ISO 14688-1 (2013) handelt es sich bei den Anhaftungen um eine schluff- und

tonhaltige Fraktion (siehe Anlage 8-12). Der Anteil der Tonfraktion an den Anhaftungen nimmt einen Massenanteil von etwa 8 % ein (Abbildung 4-12).

Vor allem die Tonfraktion, die sich neben Tonmineralen auch aus organischem Material in Form von Humuskolloiden zusammensetzt, kann aufgrund ihrer hohen spezifischen Oberfläche und der Fähigkeit des Ionenaustausches überproportional viele Schadstoffe adsorbieren (LFU, 1993).

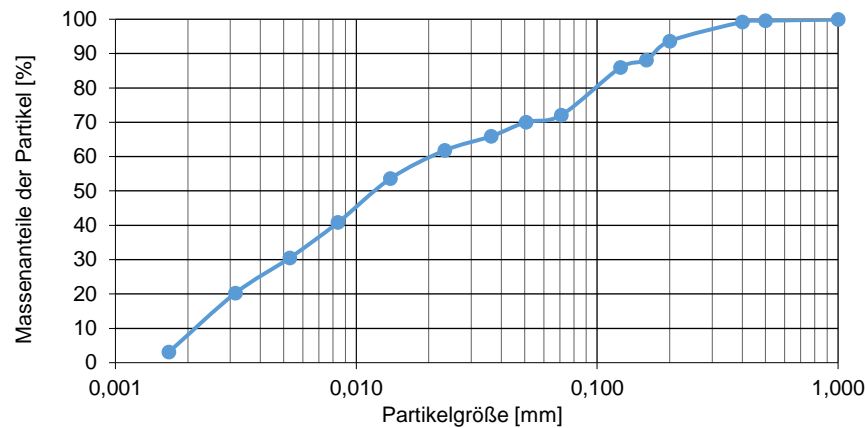


Abbildung 4-12: Sieblinie der Anhaftungen des Aufgabegutes

Gehalt organischer Bestandteile der Anhaftungen

Die Anhaftungen bestehen überwiegend aus mineralischen Substanzen und weisen in Abhängigkeit der verwendeten Siebschnitte nur geringen Schwankungen im Wertebereich auf. Mit abnehmender Partikelgröße steigt der Gehalt organischer Substanzen (Abbildung 4-13). Ein Vergleichbares Verhalten zeigen die TOC-Gehalte, gemessen als Parallelansatz (Abbildung 4-14).

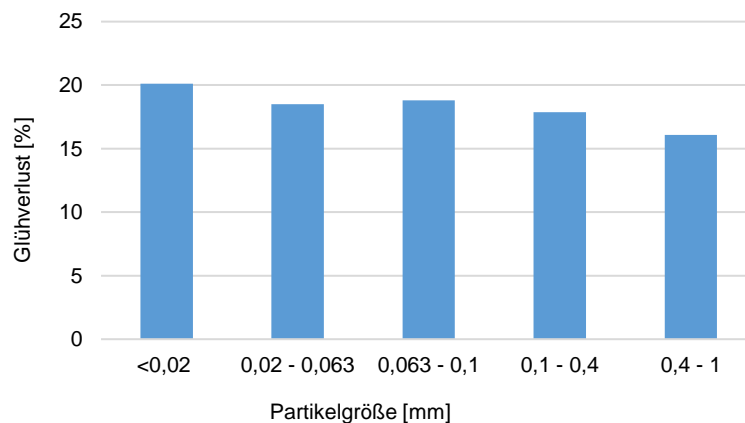


Abbildung 4-13: Glühverlust der Anhaftungen des Aufgabegutes

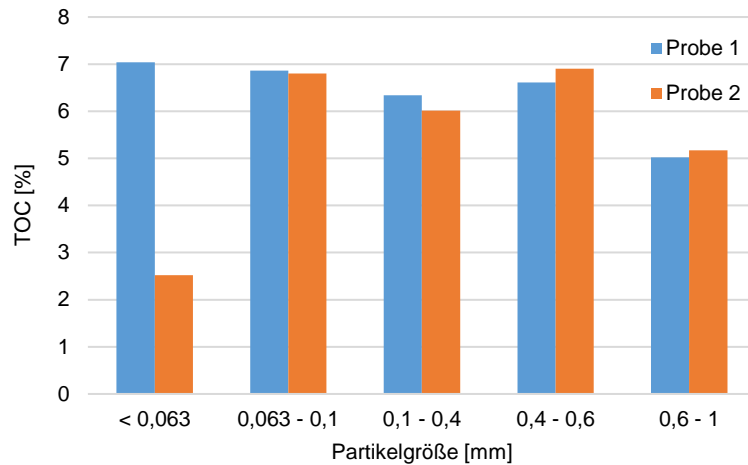


Abbildung 4-14: TOC- Gehalte der Anhaftungen des Aufgabegutes

In einem weiteren Schritt wurden die spezifischen Anhaftungen einzelner Komponenten des Deponates, wie zum Beispiel von Holz, Kunststoff, Kies und Keramik bzw. Glas aus zwei unterschiedlichen Proben im mehrfach- Ansatz untersucht. Abbildung 4-15 zeigt, dass die Anhaftungen an organischen Komponenten gegenüber inerten Bestandteilen deutlich höhere Gehalte an Gesamtkohlenstoff aufweisen. Die Ursache hierfür liegt vermutlich in den Oberflächenkräften, die bei organischen Materialien stärker sind als bei Inertmaterial.

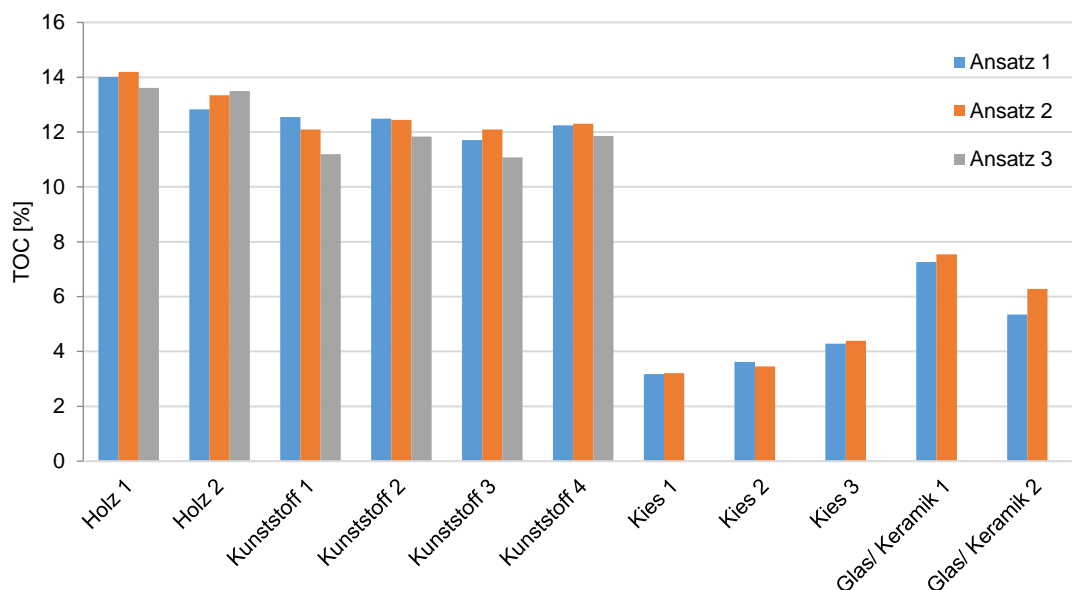


Abbildung 4-15: TOC-Gehalte der Anhaftungen des Aufgabegutes nach Trägermaterial

Schwermetallkonzentrationen der Anhaftungen

Die Ergebnisse der Schwermetallanalyse zeigen, dass die Schadstoffkonzentrationen mit abnehmender Partikelgröße zunehmen (Tabelle 4-8). Eine Ausnahme bildet Cadmium. Gegenüber den Schwermetallgehalten im Aufgabegut (Anlage 8-24) bzw. den in der LAGA M 20 (2012) genannten Orientierungswerten für Bauschutt, die nachfolgend als Vergleichsgrößen

dienen sollen, liegen die Schwermetallgehalte in den Anhaftungen in deutlich erhöhten Konzentrationen vor.

Tabelle 4-8: Schwermetallgehalte der Anhaftungen des Aufgabegutes

Partikelgröße d [mm]	Cadmium	Mangan	Nickel	Eisen	Kupfer	Blei	Zink
	mg/kg TS						
1	u. BG	333	76	33.333	500	250	1.500
0,6	u. BG	422	86	34.625	633	295	1.689
0,4	u. BG	500	91	38.333	666	600	1.833
0,1	u. BG	500	101	43.333	833	600	2.000
0,063	u. BG	500	108	43.333	2.333	500	2.000
<0,02	6,6	533	133	60.000	1.666	1.000	4.333
Aufgabegut ¹	u. BG	-	71	-	289	271	920
LAGA ²	3	-	200	-	200	300	500

u.BG = Messwerte liegen unterhalb der Bestimmungsgrenze von 3,33 mg/kg

¹ Analyseergebnisse aus der Untersuchung des Aufgabegutes < 25mm, < 60 mm und 10 - 60 mm, angegeben als Medianwert

² Orientierungswerte für die Bewertung von schadstoffbelasteten Gebäuden, Bauteilen oder Bauschutt vor der Aufbereitung [LAGA M 20, 2003, Tabelle II 1.4.4]

Tabelle 4-9 zeigt die Schwermetallgehalte der Anhaftungen nach ihren Trägermaterialien, wobei die organischen Komponenten gegenüber den inerten Komponenten tendenziell höhere Schwermetallbelastungen aufweisen.

Tabelle 4-9: Schwermetallgehalte der Anhaftungen des Aufgabegutes unterschiedlicher Trägermaterialien

Komponente	Cadmium	Mangan	Nickel	Eisen	Kupfer	Blei	Zink
	mg/kg TS						
Holz 1	u.BG	500	100	48.333	833	533	2.000
Holz2	u.BG	333	100	50.000	833	300	1.833
Kunststoff 1	6,6	666	116	58.333	1.333	500	2.666
Kunststoff 2	5,0	500	135	55.000	1.250	500	2.500
Kunststoff 3	6,6	666	133	56.000	1.666	533	2.666
Kunststoff 4	u.BG	500	125	50.000	1.250	550	2.500
Kies 1	u.BG	500	60	38.333	2.666	116	833
Kies 2	u.BG	333	103	40.000	500	800	833
Kies 3	u.BG	500	116	46.666	500	833	1.000
Glas/ Keramik 1	6,6	500	100	40.000	1.333	666	1.666
Glas/ Keramik 2	3,3	500	113	32.000	833	833	1.500
Aufgabegut ¹	u. BG	-	71	-	289	271	920
LAGA ²	3,0	-	200	-	200	300	500

u.BG = Messwerte liegen unterhalb der Bestimmungsgrenze von 3,33 mg/kg

¹ Analyseergebnisse aus der Untersuchung des Aufgabegutes < 25mm, < 60 mm und 10 - 60 mm, angegeben als Medianwert

² Orientierungswerte für die Bewertung von schadstoffbelasteten Gebäuden, Bauteilen oder Bauschutt vor der Aufbereitung [LAGA M 20, 2003, Tabelle II 1.4.4]

Fazit

Die auswaschbaren bzw. abschlämmbaren Anhaftungen bilden einen wesentlichen Massenanteil des Aufgabegutes. Sie setzen sich vorwiegend aus mineralischen Komponenten sowie im geringeren Umfang aus organischen Substanzen zusammen. Die Anhaftungen bestehen aus feinstkörnigen Partikeln mit erhöhtem Schadstoffbindungsvermögen. Im Rahmen der nassmechanischen Aufbereitung erscheint es zweckmäßig, diese Anhaftungen weitestgehend von dem Deponat abzutrennen und damit die Produktqualitäten der erzeugten Stoffströme zu verbessern. Im Rahmen der Prozesswasseraufbereitung sind diese abschlämmbaren Bestandteile aus dem Prozesswasser abzuscheiden und einer gesonderten Behandlung und Beseitigung zuzuführen (LFU, 1993).

4.2 Massenbilanzierung der nassmechanischen Aufbereitung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind mehrere Versuche zur nassmechanischen Aufbereitung von Deponat unterschiedlicher Partikelgrößen mittels Setztechnik durchgeführt worden. Behandelt wurden Deponate mit Siebschnitten < 25 mm, < 60 mm und 10 - 60 mm (siehe auch Tabelle 3-2).

Die Massenbilanzen stellen die im Rahmen der Versuchsdurchführungen ermittelten Massen der Austragsgüter als Medianwert, bezogen auf die Trockensubstanz dar (Anlage 8-13 ff.).

Die Aufbereitung der Feinfraktion < 25 mm führt zu einem hohen Anteil an Leichtgut, das über den Überlauf ausgetragen wird (Abbildung 4-16). Der hohe Massenanteil des Leichtgutes resultiert vorwiegend aus der im Aufgabegut enthaltenen Bodenfraktion < 10 mm, die mit einem Massenanteil von etwa 2/3 im Aufgabegut vertreten ist (Abbildung 4-1). Diese Fraktion weist gegenüber dem Schwergut eine geringere Dichte auf und wird über den Überlauf ausgetragen.

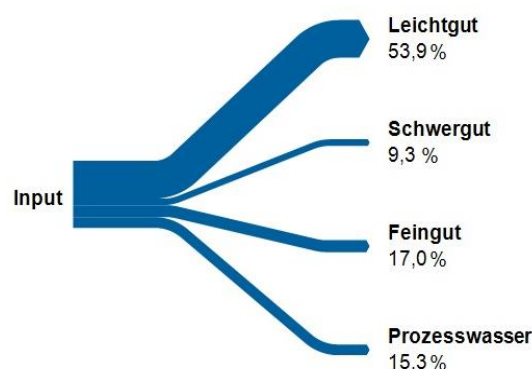


Abbildung 4-16: Massenbilanz - Aufbereitung von Deponat < 25 mm
– Angaben bezogen auf TS

Abbildung 4-17 zeigt die Massenbilanz der Aufbereitung der Feinfraktion < 60 mm. Gegenüber der Aufbereitung der Feinfraktion < 25 mm reduziert sich der Massenanteil des Leichtgutaustrages. Zurückzuführen ist dies auf den geringeren Massenanteil der Bodenfraktion < 10 mm, der in der Feinfraktion < 60 mm mit einem Massenanteil von 50 % vertreten ist (Abbildung 4-1) und auf die gleichzeitige Zunahme der heizwertreichen Komponenten mit geringer Dichte bei zunehmender Partikelgröße. Die Massenzunahme des Schwergutaustrages resultiert ebenso aus dem breiteren Partikelgrößenspektrum des Aufgabegutes.

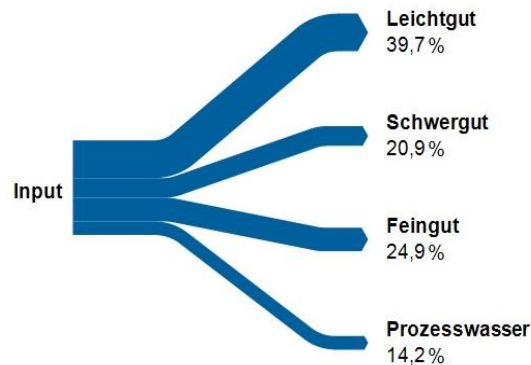


Abbildung 4-17: Massenbilanz - Aufbereitung von Deponat < 60 mm
– Angaben bezogen auf TS

Die Aufbereitung des Deponates mit der Partikelgröße 10 - 60 mm führt zu etwa gleich großen Schwer- und Leichtgutausträgen, wobei insgesamt der höchste Anteil an Schwergut generiert werden konnte. Die fehlende Bodenfraktion < 10 mm führt gegenüber den vorangegangenen Massenbilanzen zu einer weiteren Reduktion des Leichtgutaustrages, weiterhin reduziert sich der Feststoffanteil im Prozesswasser erheblich.

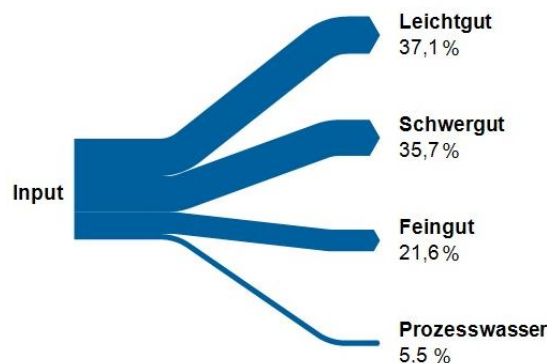


Abbildung 4-18: Massenbilanz - Aufbereitung von Deponat 10 - 60 mm
– Angaben bezogen auf TS

Fazit

In Abhängigkeit des Partikelgrößenspektrums im aufzubereitenden Aufgabegutes ergeben sich aus der nassmechanischen Aufbereitung unterschiedliche Massenbilanzen.

Die Aufbereitung der Fraktion 10 - 60 mm liefert den höchsten Massenanteil an Schwergut. Der Leichtgutaustrag wird wesentlich durch die Anwesenheit von Bodenmaterial beeinträchtigt mit entsprechend negativen Auswirkungen auf die Verwertungsmöglichkeiten dieser Stoffgruppe (s. Kapitel 4.3).

Der Massenanteil des Feingutes liegt für die unterschiedlichen Aufgabegüter im Bereich zwischen 17 % und 24,9 %. Eine Abhängigkeit des Massenanteiles des Feingutaustrages von der Art des Aufgabegutes lässt sich nicht ableiten.

Mit dem Abscheiden der Bodenfraktion < 10 mm aus dem Aufgabegut wird der Feststoffgehalt im Prozesswasser deutlich reduziert, hieraus resultiert eine erhöhte Nutzungsdauer des Prozesswassers. Ebenso sinkt der Aufwand hinsichtlich der Prozesswasseraufbereitung.

4.3 Charakteristik der Austragsgüter aus der nassmechanischen Aufbereitung

4.3.1 Glühverlust und stoffliche Zusammensetzung der Austragsgüter des Aufgabegutes < 25 mm

Die Glühverluste des Aufgabegutes < 25 mm und der zugehörigen Austragsgüter sind in Abbildung 4-19 dargestellt. Das Aufgabegut < 25 mm besteht zu etwa zwei Drittel aus Bodenmaterial < 10 mm (siehe auch Abbildung 4-1) und hat einen mittleren Glühverlust von 19,5 % (siehe auch Anlage 8-18). Die Schwergut- und Feingutausträge weisen demgegenüber einen deutlich niedrigeren Gehalt an organischer Substanz auf. Dennoch ist der Organikgehalt im Feingutaustrag für eine stoffliche Verwertung dieses Stoffstromes zu hoch. Infolge der nassmechanischen Aufbereitung kommt es außerdem zu einer Anreicherung der organischen Substanz im Leichtgutaustrag. Bedingt durch den hohen Bodenanteil erscheint auch das Leichtgut für eine energetische Verwertung weniger geeignet.

Der Schwergutaustrag < 25 mm setzt sich überwiegend aus Glas und Steinen zusammen (Abbildung 4-20). Die Fremdstoffanteile in Form des Sortierrestes, der überwiegend aus bodenähnlichem Material sowie geringen Anteilen von Kunststoffen und Holz besteht, stellen etwa ein Drittel der Gesamtmasse dar und beeinträchtigt die Möglichkeiten einer stofflichen Verwertung des Schwergutaustrages.

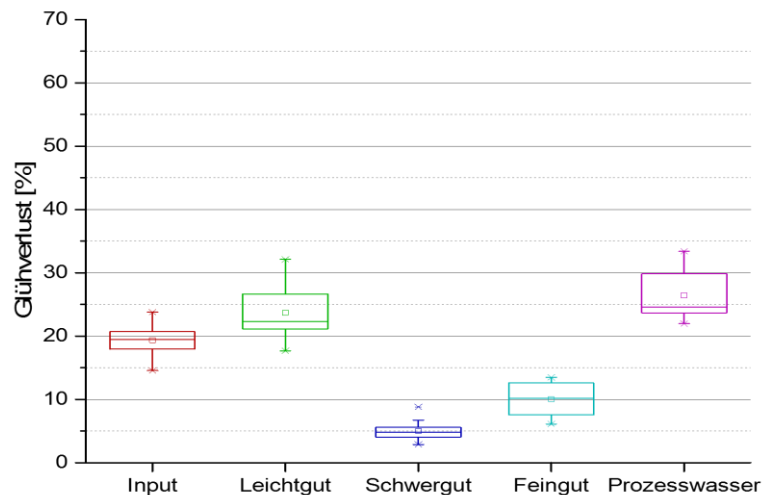


Abbildung 4-19: Glühverluste der Stoffströme aus dem Aufgabegut < 25 mm

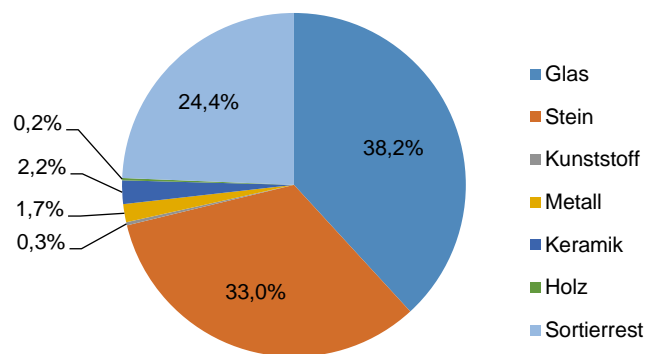


Abbildung 4-20: Stoffliche Zusammensetzung des Schwergutaustrages aus dem Aufgabegut < 25 mm

4.3.2 Glühverlust und stoffliche Zusammensetzung der Austragsgüter des Aufgabegutes < 60 mm

Gegenüber der Aufbereitung des Aufgabegutes < 25 mm enthalten die Schwergut- und Feingutausträge aus dem Aufgabegut < 60 mm geringere Anteile organischer Substanz. Der Leichtgutaustrag enthält im Vergleich zum Leichtgutaustrag < 25 einen deutlich höheren Gehalt organischer Substanz, dennoch ist aufgrund des mittleren Glühverlustes von ca. 40 % eine energetische Verwertung kritisch zu betrachten (Abbildung 4-21 bzw. Anlage 8-20).

Der Schwergutaustrag (Abbildung 4-22) weist gegenüber dem Schwergutaustrag des Aufgabegutes < 25 mm einen höheren Anteil der Steinfraktion und einen wesentlich geringeren Anteil an Fremdstoffen auf, der sich überwiegend aus dem Sortierrest (bodenähnliches Material) zusammensetzt.

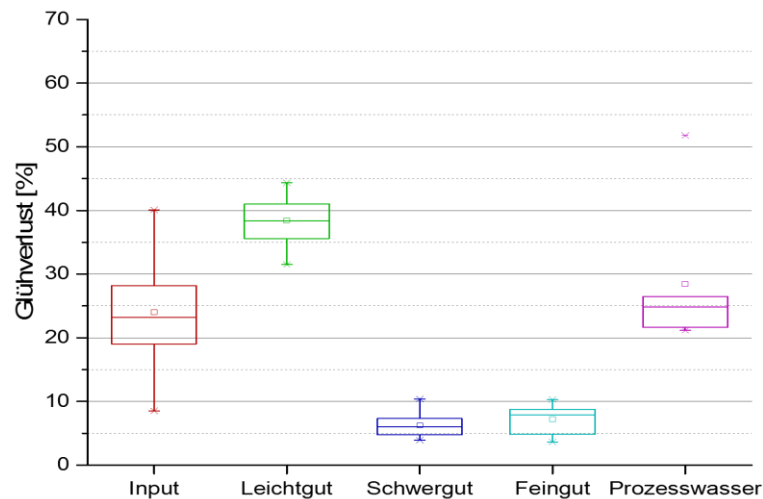


Abbildung 4-21: Glühverluste der Stoffströme aus dem Aufgabegut < 60 mm

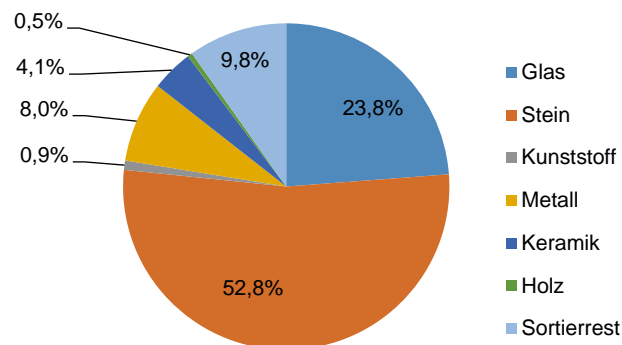


Abbildung 4-22: Stoffliche Zusammensetzung des Schwergutaustrages aus dem Aufgabegut < 60 mm

4.3.3 Glühverlust und stoffliche Zusammensetzung der Austragsgüter des Aufgabegutes 10 - 60 mm

Der Glühverlust des Aufgabegutes 10 - 60 mm beträgt im Mittel 23,9 % (Anlage 8-22) und ist trotz des vorherigen Abscheidens der Bodenfraktion < 10 mm mit denen der beiden anderen Aufgabegüter vergleichbar. Die Ursache dafür resultiert aus dem Massenverhältnis zwischen heizwertreichen und inerten Bestandteilen innerhalb des Aufgabegutes.

Der Schwergutaustrag 10 - 60 mm hat einen mittleren Glühverlust von 3,9 % und weist im Vergleich zu dem Schwergutaustrag der beiden anderen Aufgabegüter den niedrigsten Gehalt organischer Bestandteile auf. Der Feingutaustrag weist mit einem mittleren Glühverlust von 5,3 % ebenfalls im Vergleich zu den anderen Aufgabegütern den niedrigsten Wert auf.

Mit dem Abscheiden der Bodenfraktion < 10 mm vor der nassmechanischen Aufbereitung kann der Organikgehalt des Leichtgutaustrages deutlich gesteigert werden. Die Fraktion weist mit

51,7 % den höchsten Glühverlust für alle betrachteten Leichtgutausträge auf und scheint damit für eine energetische Verwertung am ehesten geeignet.

Die stoffliche Zusammensetzung des Schwergutaustrages 10 - 60 mm ist in Abbildung 4-24 dargestellt. Aufgrund der Materialbeschaffenheit konnte die Siebanalyse um die Fraktionen Ne/Fe- Metalle erweitert werden. Das Schwergut setzt sich aus den Hauptkomponenten Glas, Stein und Keramik zusammen und weist mit einem Massenanteil von etwa 2,6 % den insgesamt geringsten Anteil an Fremdstoffen auf, weshalb es für eine stoffliche Verwertung bevorzugt geeignet ist.

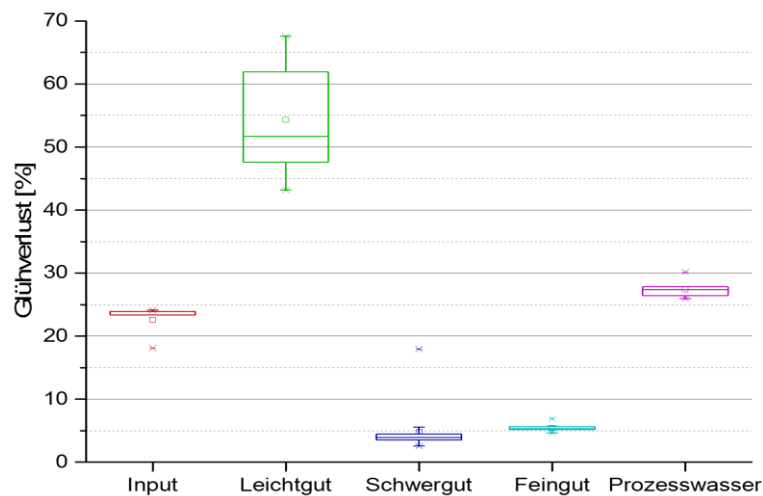


Abbildung 4-23: Glühverluste der Stoffströme aus dem Aufgabegut 10 - 60 mm

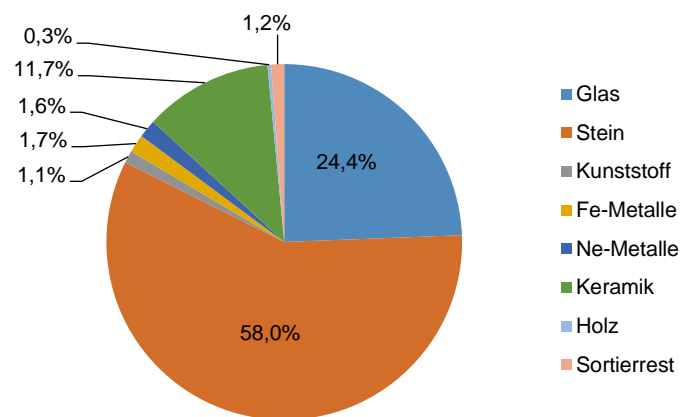


Abbildung 4-24: Stoffliche Zusammensetzung des Schwergutaustrages aus dem Aufgabegut 10 - 60 mm

Fazit

Die nassmechanische Aufbereitung von Deponat mittels Setzbetttechnik ermöglicht, unabhängig von dem im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Aufgabegut, grundsätzlich die Erzeugung eines Schwergutes mit vergleichsweise geringen Gehalten an organischer Substanz.

Im Hinblick auf die Verwertbarkeit der erzeugten Austragsströme als Baustoff konnten mit der Aufbereitung des Aufgabegutes 10 - 60 mm die besten Ergebnisse erzielt werden. Das Abtrennen der Bodenfraktion < 10 mm führt neben den geringeren Glühverlusten im Schwergut zu einer deutlichen Reduktion der Fremdstoffanteile und zu einer Minderung des Gehaltes organischer Komponenten im Feingutaustrag. Weiterhin führt das Abtrennen dieser Fraktion im Aufgabegut zu einem Anstieg des Glühverlustes im Leichtgutaustrag, so dass sich die Bedingungen dieses Stoffstromes für eine energetische Verwertung verbessern.

4.3.4 Sortiergüte des Aufbereitungsprozesses

Das Ziel der Versuchsdurchführung bestand in der Anreicherung mineralischer Komponenten im Schwergutaustrag. Als Grundlage für die Bewertung der Sortiergüte wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit vereinfachend der Störstoffanteil im Schwergutaustrag und Leichtgutaustrag als Bewertungskriterium für die Sortiergüte herangezogen.

Die Ermittlung des Sortierbarkeitsindex, der im Bereich der Erzaufbereitung mit Hilfe der Formel (3-2) angewendet wird, ist für das verwendete Aufgabegut nicht anwendbar, da es sich bei dem Aufgabegut um ein inhomogenes Vielstoffgemisch handelt. Auch auf die Bewertung der Sortiergüte anhand der Wertstoffausbringung gemäß der Formel (3-3) wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit verzichtet, da sich die entsprechenden Wertstoffgehalte weder im Aufgabegut noch in den Produktströmen hinreichend genau ermitteln ließen.

In Tabelle 4-10 sind die Fremdstoffgehalte im Schwergutaustrag, in Abhängigkeit des verwendeten Aufgabegutes zusammengefasst. Mit einem Massenanteil von 2,6 % enthält der Schwergutaustrag aus der Aufbereitung des Aufgabegutes der Fraktion 10 - 60 mm den geringsten Fremdstoffanteil. Ergänzend erfolgte für den Leichtgutaustrag der Fraktion 10 – 60 mm eine Sortieranalyse zur Bestimmung der enthaltenen Fremdstoffanteile, zu der die Fraktionen Mineralik, Keramik, Glas, Metallen und der Sortierrest (Bodenmaterial) zählen. Eine Sortierung des Leichtgutes < 25 mm sowie < 60 mm wurde aufgrund der hohen Anteile von Bodenmaterial nicht durchgeführt. Es wurde jedoch bereits in den vorangegangenen Abschnitten bestätigt, dass mit Zunahme des Bodenanteiles < 10 mm im Aufgabegut auch der Fremdstoffanteil im Leichtgutaustrag ansteigt.

Tabelle 4-10: Fremdstoffgehalte im Schwergut- und Leichtgutaustrag

Aufgabegut		
< 25 mm	< 60 mm	10 - 60 mm
Fremdstoffgehalte im Schwergutaustrag		
26,9 %	11,2 %	2,6 %
Fremdstoffgehalte im Leichtgutaustrag		
< 25 mm	< 60 mm	10 - 60 mm
-	-	22,9 %

Fazit

Die höchste Sortiergüte wurde im Rahmen der Aufbereitung des Aufgabegutes 10 - 60 mm erreicht. Die Aufbereitung des Aufgabegutes < 25 mm bzw. < 60 mm führte zu deutlich höheren Fremdstoffgehalten im jeweiligen Schwergutaustrag und damit zu einer Verschlechterung der Sortiergüte. Mit dem Abtrennen der Bodenfraktion vor der nassmechanischen Aufbereitung wird der Fremdstoffgehalt reduziert, das Verhältnis zwischen der oberen und unteren Partikelgröße im Aufgabegut verringert und die Dichtedifferenz zwischen dem Schwergut und Leichtgut im Aufgabegut vergrößert, wodurch der Sortiervorgang begünstigt wird.

4.3.5 Schadkomponenten in den Austragsgütern

Beim Einsatz von Ersatzbaustoffen im Bereich Straßenbau gelten die Anforderungen gemäß TL-Gestein-StB 04 (2007), die auf den Technischen Regeln der LAGA M 20 für Bauschutt basieren. Abweichungen innerhalb der beiden Vorgaben sind in Tabelle 2-12 dargestellt. Gemäß Tabelle D 3, TL-Gestein (2007) sind Überschreitungen der umweltrelevanten Grenzwerte im Einzelfall zulässig, werden hier jedoch nicht diskutiert.

Die Analyseergebnisse der Schwergutausträge zeigen, unabhängig vom Aufgabegut, dass zumindest die Zuordnungswerte der Klasse Z2 nach LAGA M 20 (2012) eingehalten werden können (Tabelle 4-11). Für die Schwergutausträge ist somit eine stoffliche Verwertung unter Berücksichtigung definierter Einbaubedingungen gemäß LAGA M 20 Anlage 8-3 möglich.

Die Verwertung des Feingutaustrages ist aus umweltrelevanter Sicht nur begrenzt möglich (Tabelle 4-12). Insbesondere die Proben aus der Aufbereitung des Aufgabegutes < 25 mm überschreiten die Zuordnungskriterien der Klasse Z2 beim Sulfatgehalt. Die mit der Aufbereitung des Aufgabegutes < 60 mm beziehungsweise 10 - 60 mm erzeugten Feingutausträge halten demgegenüber die Mindestanforderungen der Klasse Z2 nach LAGA M 20 ein.

Tabelle 4-11: Qualitätskennwerte der Schwergutausträge sowie Einbauklassen und Zuordnungskriterien nach LAGA M 20 (2012)

Datum			18.3.	1.4.	8.4.	15.4.	7.5.	8.5.	27.5.	Mischprobe I		
										I	II	III
Korngröße			< 25 mm			< 60 mm			10 - 60 mm			
erreichte Z- Klasse			Z2	Z2	Z1.2	Z1.2	Z1.2	Z2	Z2	Z1.2	Z1.1	Z1.2
Feststoff	Trockenmasse	%	84,3	90,3	93,9	93,5	92,4	90,8	91,9	98,5	98,5	98,5
	Kohlenwasserstoffe (C10 - C40)	mg/kg TS	990	240	360	250	330	520	210	210	230	200
	EOX	mg/kg TS	2	<1	<1	<1	2	<1	<1	2	< 1	< 1
	Summe PAK 16	mg/kg TS	34	19,4	5,8	4,1	1,7	13,5	6,38	9,24	1,47	3,64
	Summe 6 PCB	mg/kg TS	0,14	0,24	n.b.	0,15	0,34	0,08	0,1	0,24	0,08	0,13
Eluat	el. Leitfähigkeit	µS/cm	982	677	295	427	365	619	1040	378	448	360
	Chlorid	mg/l	21	18	3	20	15	15	25	16	16	11
	Sulfat	mg/l	287	182	63	103	61	99	457	81	64	44
	Phenolindex	µg/l	<10	< 10	< 10	<10	<10	<10	11	<10	<10	<10
	Arsen	µg/l	1	<1	<1	<1	3	2	1	2	1	2
	Blei	µg/l	<1	<1	9	<1	<1	2	<1	<1	<1	<1
	Cadmium	µg/l	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3
	Chrom-Gesamt	µg/l	<1	<1	<1	<1	6	2	<1	3	2	2
	Kupfer	µg/l	39	26	9	19	61	75	27	52	22	15
	Nickel	µg/l	5	3	<1	2	3	3	2	3	2	<1
	Quecksilber	µg/l	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
	Zink	µg/l	20	20	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10

n.b. – nicht berechenbar, da zur Summenbestimmung nur Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze verwendet werden

Tabelle 4-12: Qualitätskennwerte der Feingutausträge sowie Einbauklassen und Zuordnungskriterien nach LAGA M 20 (2012)

Datum			18.3.	1.4.	8.4.	15.4.	7.5.	27.5.
Korngröße			< 25 mm			< 60 mm		10 - 60 mm
erreichte Z- Klasse			> Z2	> Z2	> Z2	Z2	Z2	Z2
Feststoff	Trockenmasse	%	74,2	72,1	79,3	98	80,8	78,1
	Kohlenwasserstoffe (C10 - C40)	mg/kg TS	540	510	310	280	370	370
	EOX	mg/kg TS	<1	<1	<1	<1	4	3
	Summe PAK 16	mg/kg TS	8	6,99	4,9	3,4	5,78	9,6
	Summe 6 PCB	mg/kg TS	0,26	0,9	0,17	0,62	0,78	0,77
Eluat	el. Leitfähigkeit	µS/cm	2360	2610	1570	1160	927	954
	Chlorid	mg/l	7	13	8	16	16	10
	Sulfat	mg/l	1420	1590	848	576	412	416
	Phenolindex	µg/l	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	Arsen	µg/l	1	<1	1	1	<1	1
	Blei	µg/l	<1	<1	<1	<1	<1	<1
	Cadmium	µg/l	0,6	0,6	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3
	Chrom gesamt	µg/l	<1	<1	<1	2	3	2
	Kupfer	µg/l	66	55	18	42	44	54
	Nickel	µg/l	13	14	11	5	7	7
	Quecksilber	µg/l	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
	Zink	µg/l	140	140	60	20	30	20

Fazit

Die Mindestanforderungen für den Einsatz der Schwergut- und Feingutausträge als Baustoff werden hinsichtlich der umweltrelevanten Anforderungen im Wesentlichen eingehalten. Eine Ausnahme bildet der Feingutaustrag aus der Aufbereitung des Aufgabegutes < 25 mm, der die Zuordnungskriterien der Klasse Z2 nach LAGA M 20 (2012) für Bauschutt aufgrund erhöhter Sulfatgehalte überschreitet. Als wesentlicher Eintragspfad für Sulfat kommt vor allem die Bodenfraktion < 10 mm in Betracht (siehe auch Tabelle 4-27). Im Hinblick auf die Erzeugung von Produktqualitäten, die eine stoffliche Verwertung der Schwergut- und Feingutausträge erlauben, wird empfohlen, die Bodenfraktion vor der nassmechanischen Aufbereitung durch geeignete Siebschritte aus dem Aufgabegut abzutrennen.

4.3.6 Schadstoffpfade im Aufbereitungsprozess < 60 mm

Die Schadstoffpfade im Prozess zur Aufbereitung der Feinfraktion < 60 mm werden nachfolgend aufgezeigt. Verwendung finden die Parameter der Zuordnungskriterien nach LAGA M 20 für die Klasse Z2 für Feststoffe und Eluate. Die Kriterien für die Feststoffe werden um die Gruppe der Schwermetalle erweitert. Die Feststoffe im Prozesswasser wurden vor dem Hintergrund der Verwertbarkeit und der vergleichsweise geringen Gesamtmasse dieses Stoffstromes nicht betrachtet.

Mit Ausnahme des Sulfatgehaltes konnte kein Zusammenhang zwischen den Schadstoffgehalten der einzelnen Austragsgüter in Abhängigkeit vom Aufgabegut und dessen Partikelgrößenverteilung festgestellt werden (s.o.), so dass die nachfolgenden Analysen die Schadstoffgehalte der einzelnen Austragsgüter unabhängig vom verwendeten Aufgabegut beschreiben (Anlage 8-23 ff. und Tabelle 3-3).

Organischen Schadstoffen

Abbildung 4-25 zeigt die Gehalte an organischen Schadstoffen im Feststoff. Sowohl der Schwer- als auch der Feingutaustrag weisen im Vergleich zu den zulässigen Konzentrationen der LAGA-Zuordnungskriterien Z2 nur geringe Schadstoffbelastungen auf (Abbildung 4-25). Hohe Konzentrationen organischer Schadstoffe enthält erwartungsgemäß der Leichtgutaustrag.

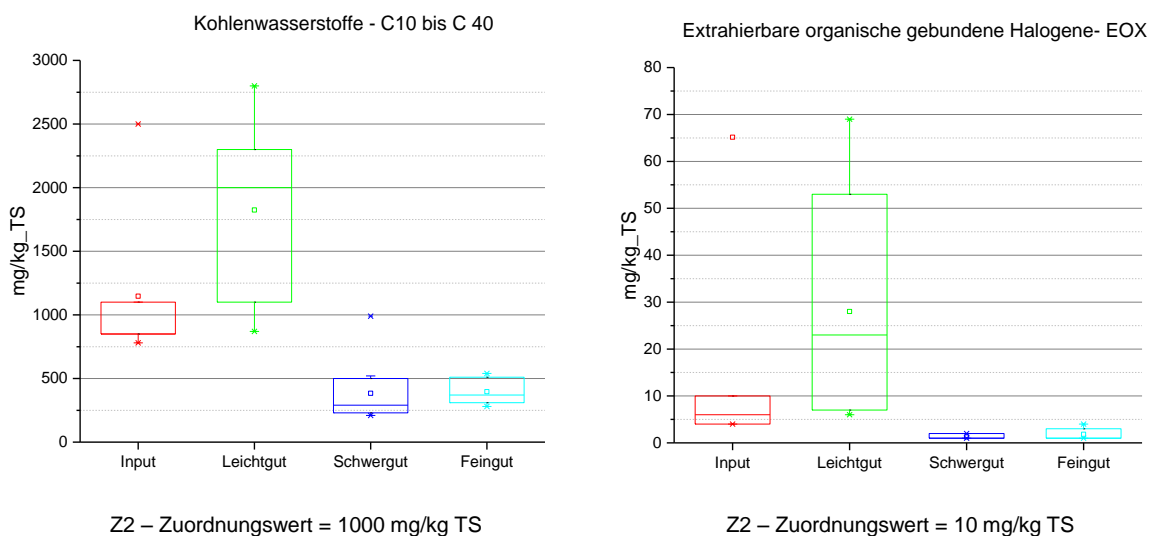


Abbildung 4-25: Organische Schadstoffe im Feststoff, Teil I

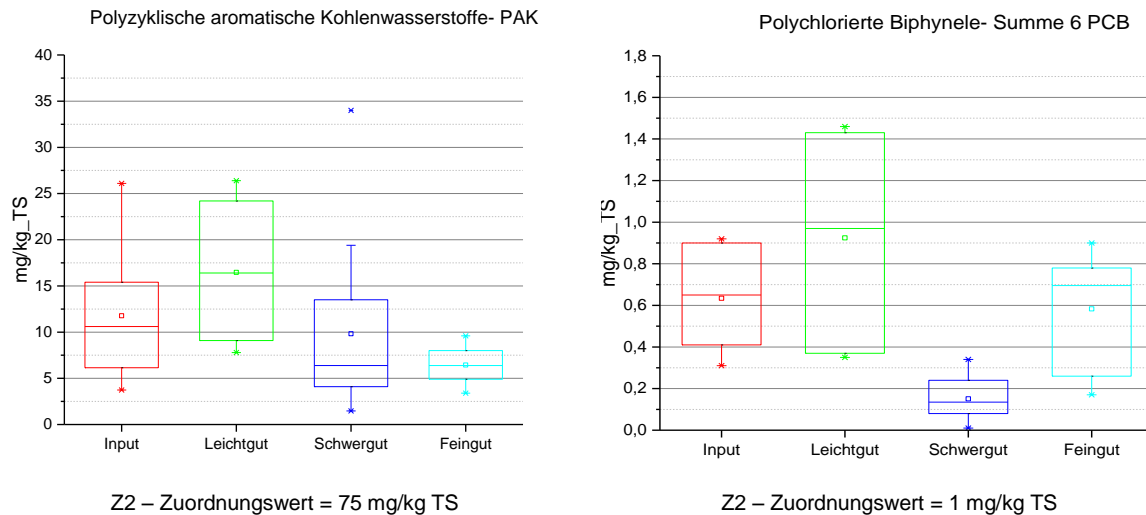


Abbildung 4-25: Organische Schadstoffe im Feststoff, Teil II

Schwermetalle im Feststoff

Die Mitteilung M 20 nach LAGA enthält keine Zuordnungskriterien für Schwermetalle im Feststoff. Als Vergleichsgröße werden deshalb die Orientierungswerte für Schadstoffe im Feststoff, Tabelle II.1.4-4; LAGA M 20, verwendet.

Die Schwermetallgehalte des Schwer- und Feingutaustrags entsprechen im Wesentlichen den Orientierungswerten nach LAGA M 20 (Abbildung 4-26). Deutliche Überschreitungen ergeben sich für die Elemente Kupfer und Zink, wobei die hohen Metallkonzentrationen vermutlich auf die Anwesenheit von Kupfer und Zink in Form von Schrottbestandteilen zurückzuführen sind, da eine Metallabscheidung im Rahmen der Versuchsdurchführung nicht stattgefunden hat. Eine stoffstromspezifische Anreicherung von Schwermetallen kann nicht nachgewiesen werden.

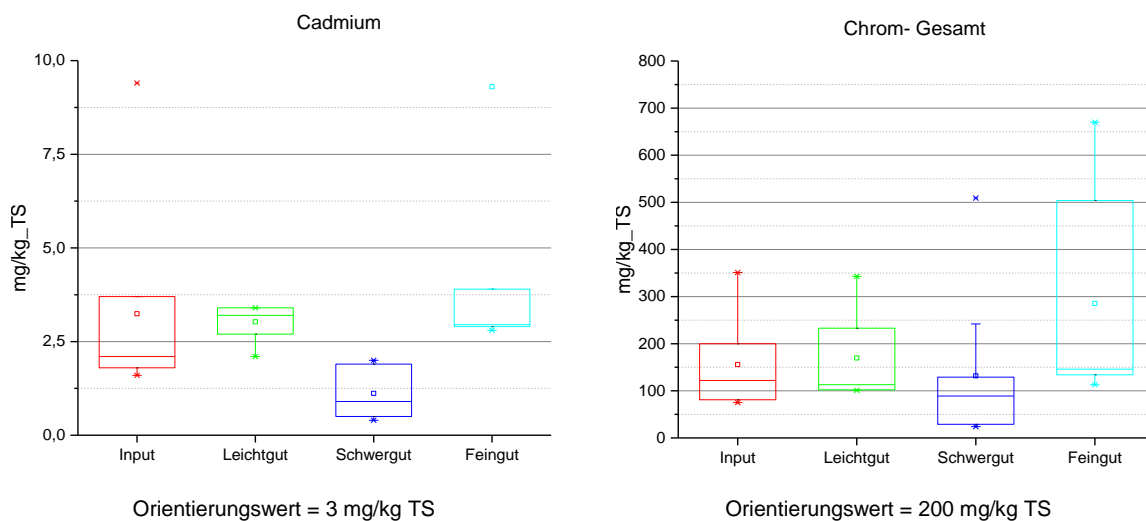


Abbildung 4-26: Schwermetalle im Feststoff (Auszug), Teil I

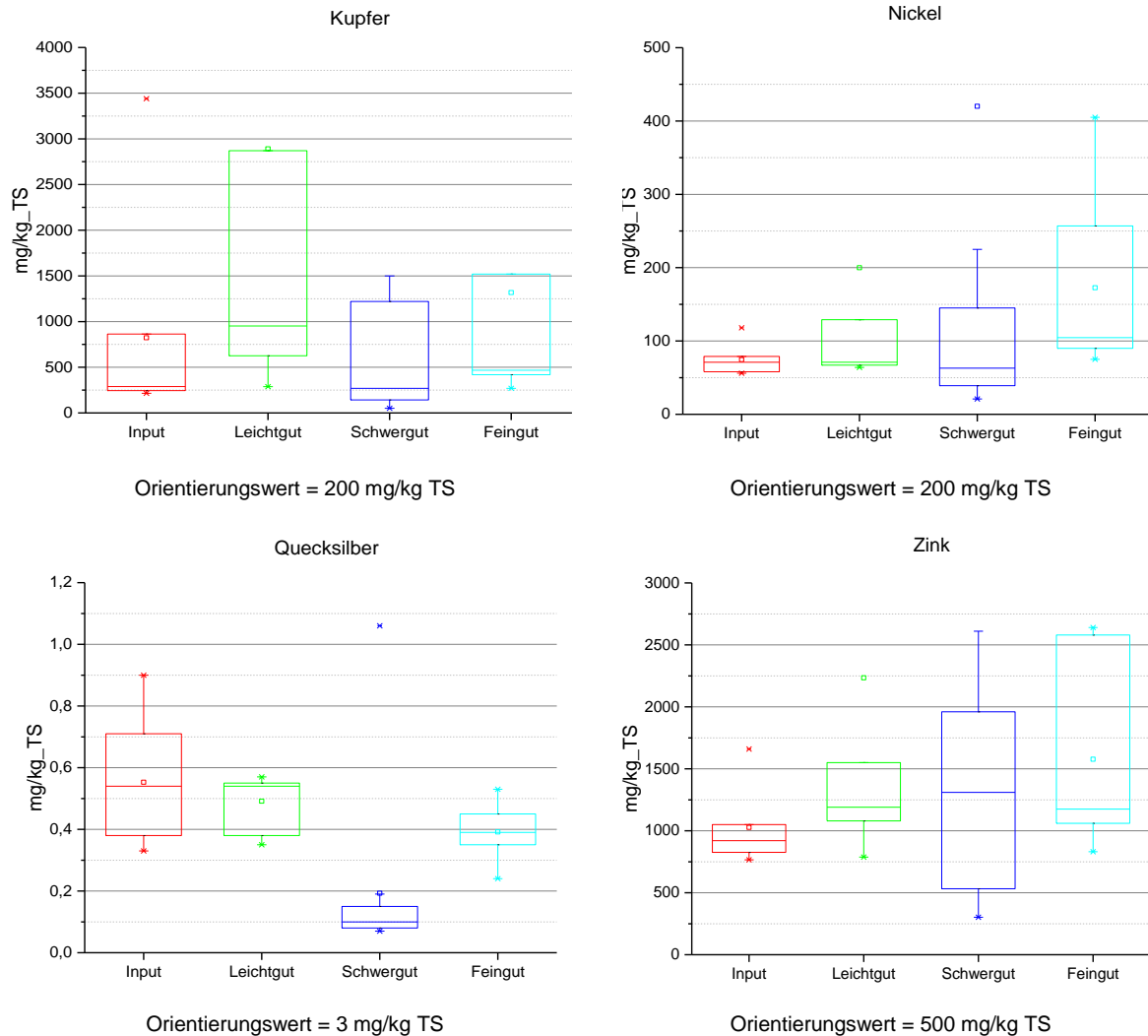


Abbildung 4-26: Schwermetalle im Feststoff (Auszug), Teil II

Salzkonzentration im Eluat

Sowohl für das Aufgabegut als auch die Austragsgüter werden die Grenzwerte für die elektrische Leitfähigkeit gemäß der Zuordnungsklasse Z2 eingehalten (Abbildung 4-27). Die höchsten Leitfähigkeiten weisen das Aufgabegut und der Feingutaustrag auf.

Der Grenzwert für die Chloridkonzentration gemäß der Zuordnungsklasse Z2 wird von allen Stoffströmen deutlich unterschritten, die höchsten Chloridkonzentrationen weisen das Aufgabegut und der Leichtgutaustrag auf.

Die Gegenüberstellung der elektrischen Leitfähigkeit mit den Sulfatgehalten zeigt, dass der Sulfatgehalt maßgeblich die Höhe der elektrischen Leitfähigkeit bestimmt. Der Schwergutaustrag hält dabei die Zuordnungskriterien der Klasse Z2 ein. Zu einer Aufkonzentration von Sulfat kommt es insbesondere im Feingutaustrag, so dass in diesem Fall der Zuordnungswert nach LAGA M 20 teilweise deutlich überschritten wird. Der Eintrag von Sulfat in Deponien erfolgt vorwiegend über Bauschutt in Form von Gips, der feinkörnig vorliegt. Im Hinblick auf

die stoffliche Verwertung des Feingutes als Baustoff stellt der Sulfatgehalt eine kritische Größe dar. Sulfatkonzentrationen von über 600 mg/l gelten dabei als beton- und zementangreifend (Mallon, 2005).

Im Gesamtvergleich stellt der Schwergutaustrag den Stoffstrom mit der geringsten Salzbelastung dar. Mit Ausnahme des Sulfatgehaltes im Feingutaustrag weisen alle Austragsgüter geringere Salzkonzentrationen gegenüber dem Aufgabegut auf.

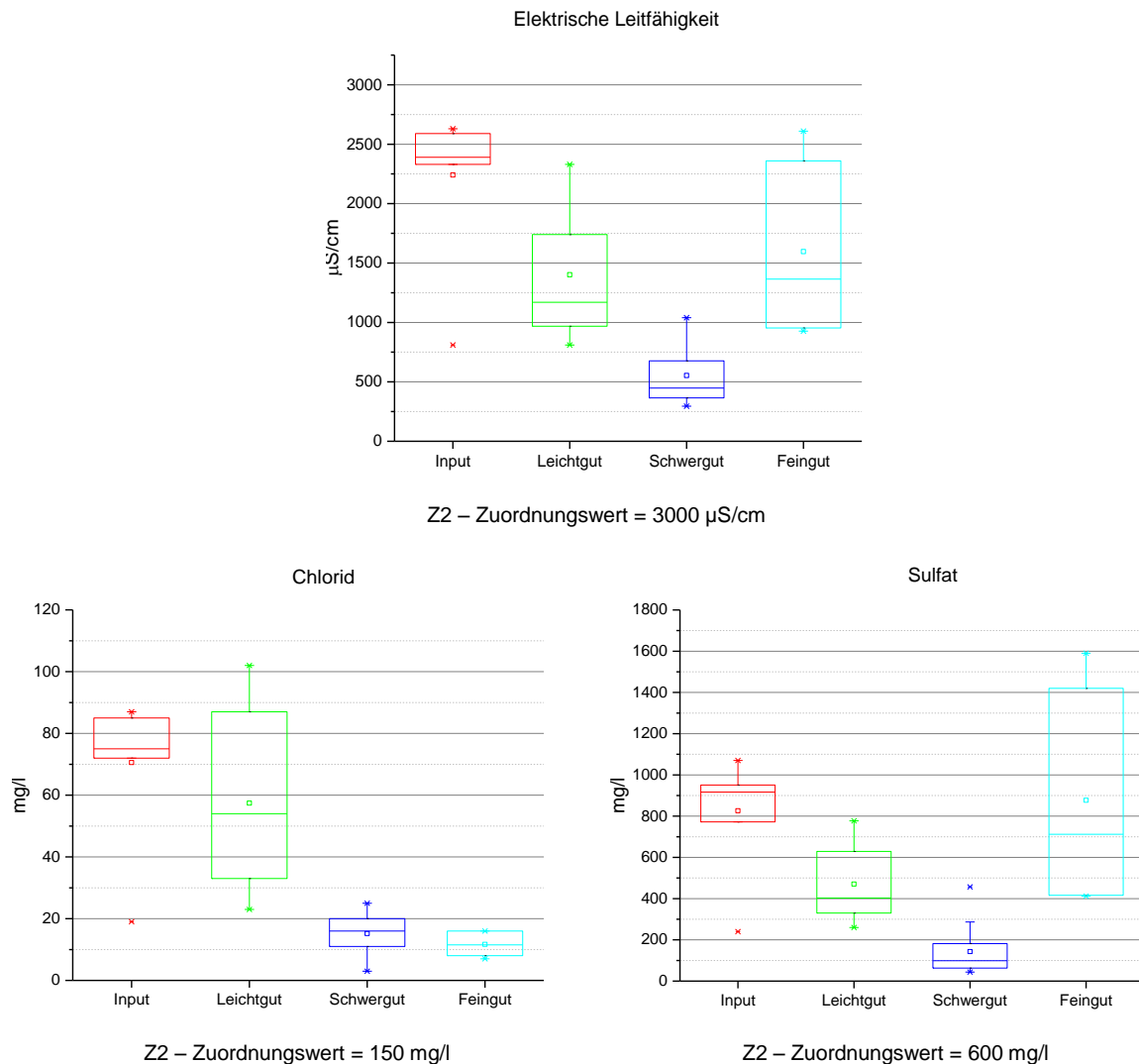


Abbildung 4-27: Salzkonzentrationen im Eluat

Schwermetalle im Eluat

Die Schwermetallkonzentrationen für die Elemente Arsen, Blei, Chrom, Cadmium und Quecksilber liegen bis auf wenige Ausnahmen unterhalb der jeweiligen Nachweisgrenze. Bei den leicht mobilisierbaren Schwermetallen Kupfer, Nickel und Zink liegen geringfügig erhöhte Werte vor, die jedoch deutlich unterhalb der zulässigen Konzentrationen liegen (Abbildung 4-28). Der Feingutaustrag weist hier im Vergleich zum Schwergutaustrag eine höhere Schwer-

metallbelastung im Eluat auf. Gegenüber dem Aufgabegut weisen die Austragsgüter insgesamt geringere Schwermetallgehalte im Eluat auf und die Schwermetallkonzentrationen im Eluat stellen im Allgemeinen keinen kritischen Parameter dar.

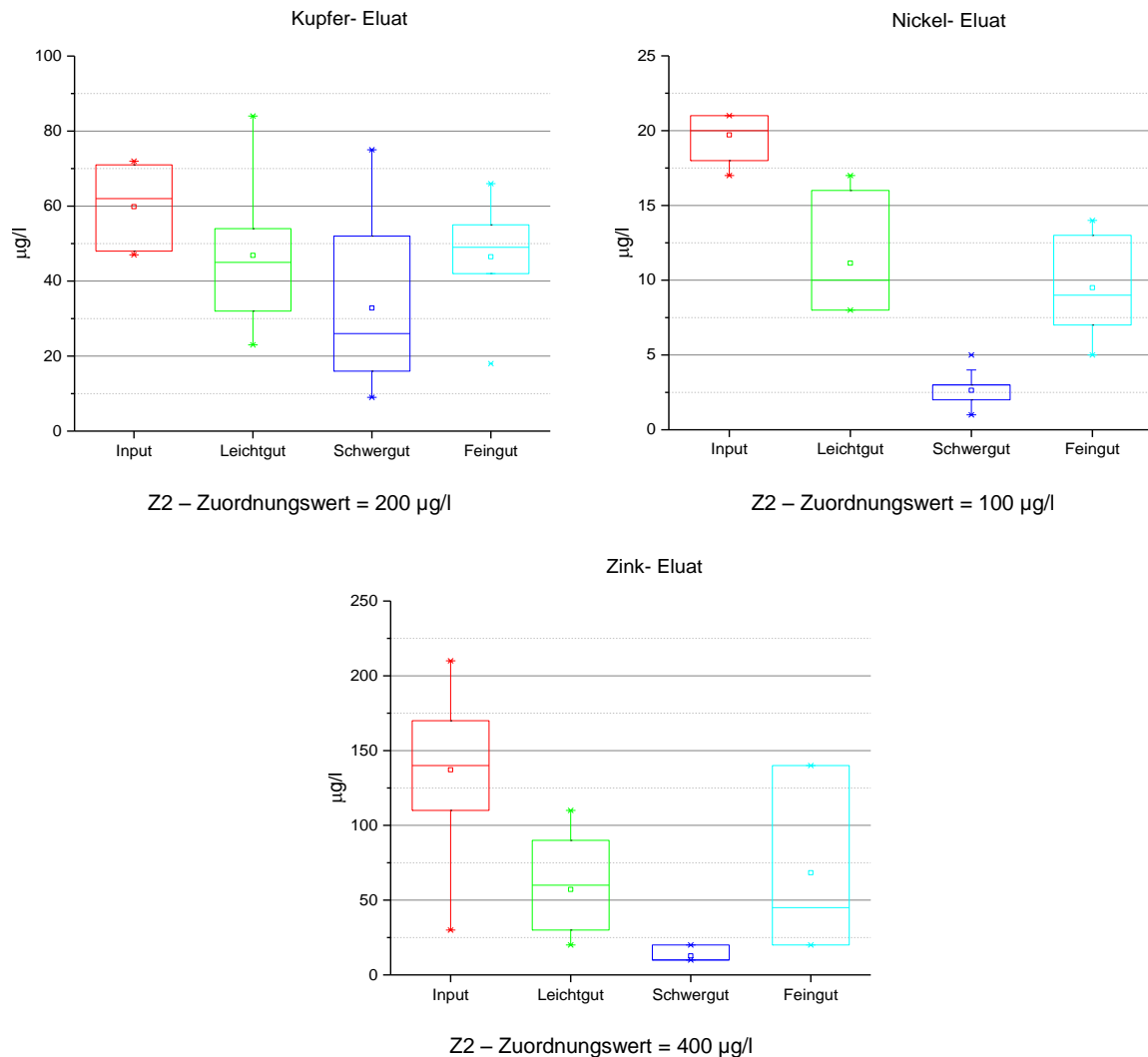


Abbildung 4-28: Schwermetalle im Eluat (Auszug)

Phenole im Eluat

Der Phenolindex als Parameter für eluierbare organische Schadstoffe lag mit wenigen Ausnahmen unterhalb der Nachweisgrenze der Analyseverfahren und damit unterhalb des zulässigen Z2-Wertes, so dass dieser Parameter für alle Austragsgüter als unkritisch eingeschätzt werden kann.

Fazit

Das Aufgabegut ist insgesamt gering mit Schadstoffen belastet. Mit Ausnahme des Sulfatgehaltes entspricht das Material der Klasse Z2 der Zuordnungskriterien nach LAGA (2012).

Die erzeugten Schwergutausträge weisen insgesamt das geringste Schadstoffpotenzial auf. Sowohl die organischen Schadstoffe im Feststoff sowie die Schwermetallgehalte im Eluat stellen gemäß den Zuordnungskriterien der Klasse Z2 nach LAGA M 20 (2012) keine kritischen Parameter dar und unterschreiten die Grenzwerte deutlich.

Der Feingutaustrag weist gegenüber dem Schwergutaustrag ein höheres Schadstoffpotenzial auf, wobei teilweise Konzentrationen gemessen wurden, welche oberhalb der Konzentrationen des Aufgabegutes liegen. Hinsichtlich der Anforderungen gemäß den Zuordnungskriterien der Klasse Z2 nach LAGA M 20 (2012) stellen die organischen Schadstoffe im Feststoff sowie die Schwermetallgehalte im Eluat keine kritischen Parameter dar, eine Ausnahme bildet der Sulfatgehalt.

Der Leichtgutaustrag weist gegenüber dem Schwergut ein deutlich höheres Schadstoffpotenzial auf, dies gilt insbesondere für organische Schadstoffe im Feststoff, dem Salzgehalt sowie Schwermetallen im Eluat.

4.4 Reinigungsleistung des Waschvorganges

In nachfolgender Betrachtung wird der Einfluss des Waschvorganges während der Nassaufbereitung auf die Produktqualität des Schwergutaustrages betrachtet. Im Vordergrund steht insbesondere die Reduktion des Sulfatgehaltes (bezugnehmend auf Kapitel 4.3.5). Für die Bewertung der Reinigungsleistung der nassmechanischen Aufbereitung wurde Schwergut aus dem Aufgabegut durch Sieb- und Sortieranalysen abgetrennt, analysiert und mit den Ergebnissen aus der Schadstoffanalyse nach LAGA M 20 für die Schwergutausträge < 25 mm und < 60 mm gemäß Tabelle 3-3 verglichen.

Tabelle 4-13 zeigt den Medianwert für die elektrische Leitfähigkeit sowie den Chlorid- und Sulfatgehalt für die beiden Schwergutströme (Anlage 8-27). Der Salzgehalt des Schwergutaustrages wird durch den Auswaschungseffekt erwartungsgemäß gesenkt. Der Sulfatgehalt des aussortierten Schwergutes aus dem Aufgabegut beträgt im Mittel 238 mg/l und entspricht der Zuordnungs-kategorie Z1.2 nach LAGA M 20. Demgegenüber liegt der mittlere Sulfatgehalt des Schwergutaustrages aus der nassmechanischen Aufbereitung bei 103 mg/l und entspricht der Zuordnungs-kategorie Z1.1 nach LAGA M 20. Für das Chlorid ist der Reinigungseffekt aufgrund der niedrigen Werte weniger stark ausgeprägt.

Tabelle 4-13: Reinigungsleistung der nassmechanischen Aufbereitung am Beispiel des Schwergutes

	Schwergut aus Aufgabegut	Schwergutaustrag
Elektrische Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	727	501
Chlorid [mg/l]	19	15
Sulfat [mg/l]	238	103

Der Nachweis, dass der Anteil eluierbarer Schwermetalle infolge der nassmechanischen Aufbereitung gesenkt werden kann, konnte nicht erbracht werden. Die Ursache dafür liegt in der Analysemethodik, wobei die Schwermetallkonzentrationen zumeist unterhalb der Nachweisgrenze lagen. Aufgrund der geringen Datenlage wurde auf eine Darstellung und Auswertung vorhandener Daten verzichtet.

Fazit

Anhand der Analyseergebnisse wird bestätigt, dass durch den Einsatz von Wasser als Trennmedium für den Sortierprozess ein deutlicher Einfluss auf die Produktqualität des Schwergutes genommen werden kann. Die Chlorid- und Sulfatkonzentrationen sind im Schwergutaustrag im Mittel niedriger als in dem Schwergut aus dem Aufgabegut ohne nassmechanische Aufbereitung. Ein gleiches Verhalten wird für das Leichtgut erwartet. Die Reduktion eluierbarer Komponenten führt im Allgemeinen zu einer Aufkonzentration dieser Bestandteile im Prozesswasser und verfahrensbedingt im Feingutaustrag. Auf die Reduktion des Sulfatgehaltes im Feingutaustrag als kritischer Parameter wird dazu im Kapitel 4.5.2 eingegangen.

Die erzeugten Schwergut- und Leichtgutausträge weisen trotz nassmechanischer Aufbereitung noch deutliche Oberflächenanhaftungen auf. Dieser Sachverhalt resultiert aus der Aufbereitungstiefe der verwendeten Versuchsanlage zur nassmechanischen Aufbereitung. Die Anlage kann in ihrer Aufbereitungstiefe je nach Anforderungsprofil modifiziert bzw. erweitert werden. Einen wesentlichen Verfahrensschritt stellt im Rahmen der nassmechanischen Aufbereitung die Vorkonditionierung beziehungsweise der Nassaufschluss des Aufgabegutes, z. B. in Form von Schwert- oder Trommelwäscher dar. Diese Aggregate dienen dem Materialaufschluss und der Materialwäsche, wobei Agglomerate im Aufgabegut aufgelöst und Beläge von abschlämmbaren Bestandteilen aufgelöst werden (Heimhard, 1995; Patzold et al., 2008). Im Rahmen der Versuchsdurchführung war der Einsatz entsprechender Aggregate zur Vorkonditionierung nicht realisierbar, so dass ein Wasch- beziehungsweise Läuterprozess nicht stattfand. Durch die Vorkonditionierung des Aufgabegutes wird eine weitere Steigerung der Produktqualitäten für die Schwergut- und Leichtgutausträge erwartet, da vorhandene Oberflächenanhaftungen weiter reduziert werden können. Gleichzeitig wird der Schadstoffgehalt im Prozesswasser und Feingutaustrag zunehmen.

4.5 Charakteristik der Austragsgüter aus dem Aufgabegut 10 - 60 mm – Produktbezogen

Das vorliegende Kapitel befasst sich ausschließlich mit den Austragsgütern aus dem Aufgabegut 10 - 60 mm, da nach Würdigung der Ergebnisse aus den vorangegangenen Kapitel bevorzugt aus diesem Aufgabegut qualitativ hochwertige Sekundärrohstoffe erzeugt werden können. Die Produktbeschreibung erfolgt, ergänzend zu den vorangegangenen Kapiteln umfassender.

Das Kapitel ist produktbezogen ausgerichtet und berücksichtigt insbesondere verwertungstechnische Anforderungen, notwendige produktverbessernde Maßnahmen werden konzipiert und soweit notwendig und möglich experimentell erprobt.

4.5.1 Schwergutaustrag 10 - 60 mm

Der Schwergutaustrag wird durch niedrige Wassergehalte, im Mittel etwa 3,7 % (Anlage 8-28) sowie durch geringe Anteile organischer Substanz (Kapitel 4.3.3) und verschmutzte Oberflächen charakterisiert (Abbildung 4-29).



Abbildung 4-29: Schwergutaustrag

Sieb- und Sortieranalysen

Abbildung 4-30 zeigt die Sieblinie des Schwergutaustrages im Bereich 2 - 60 mm. Die im Aufgabegut enthaltenen Komponenten weisen nur zum Teil körnigen Strukturen auf, weshalb nachfolgend der Begriff „Partikel“ zur Beschreibung der einzelnen Stoffströme verwendet wird.

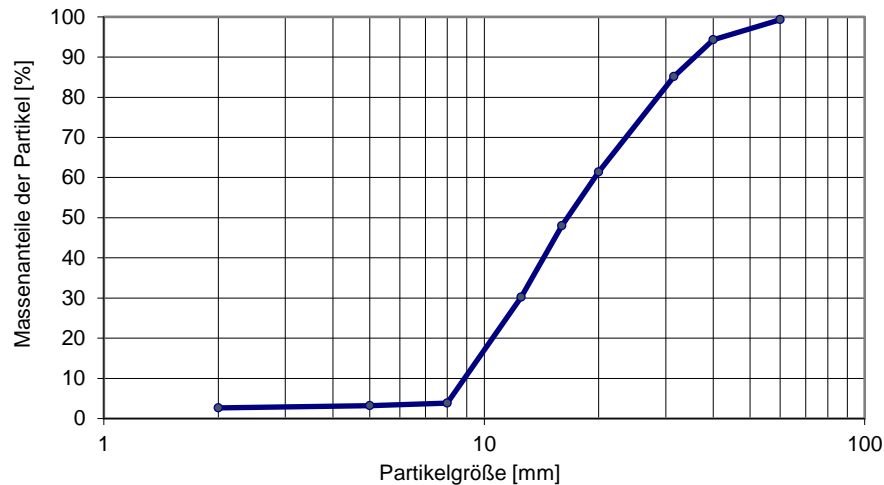


Abbildung 4-30: Sieblinie des Schwergutaustrages

Gemäß der Tabelle 1, DIN EN ISO 14688-1 (2013) kann der Schwergutaustrag aufgrund seiner Partikelgrößenverteilung als grobkörniger Boden in Form von Mittel- und Grobkies, entsprechend der Kurzbezeichnung MGr/CGr, eingestuft werden. Die Fraktion < 10 mm nimmt mit 18 % einen hohen Massenanteil am untersuchten Stoffstrom ein (Abbildung 4-30) und deutet auf einen unzureichenden Siebgütegrad während der Vorkonditionierung des Aufgabegutes hin.

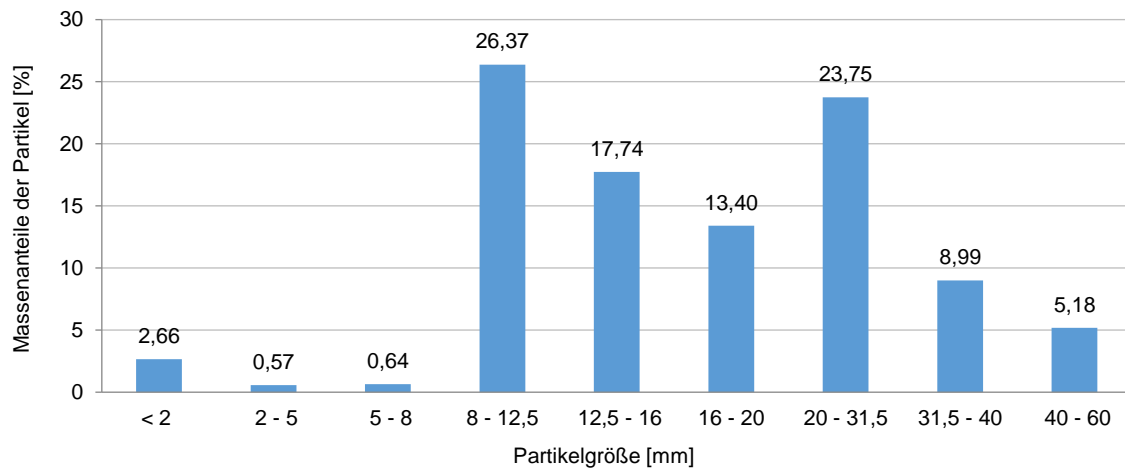


Abbildung 4-31: Relative Häufigkeit der Massenanteile des Schwergutaustrages

Die Ermittlung der stofflichen Zusammensetzung des Schwergutaustrages erfolgte bereits im Kapitel 4.3.3. Ergänzend dazu soll nachfolgend die stoffliche Zusammensetzung des Schwergutaustrages, differenziert nach Siebschnitten (Abbildung 4-32) dargestellt werden.

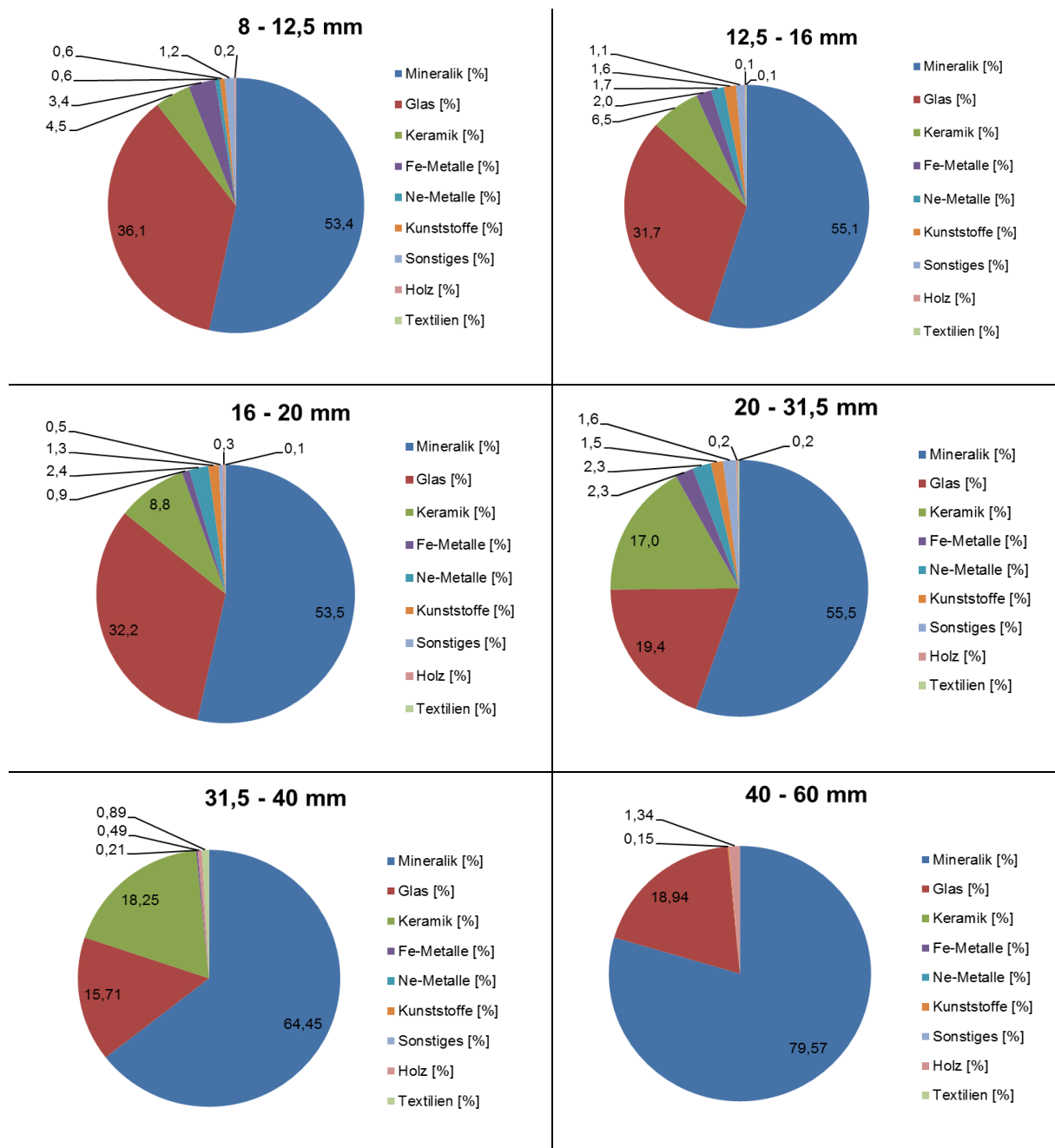


Abbildung 4-32: Stoffliche Zusammensetzung des Schwergutaustrages, differenziert nach Siebschnitten

Der Massenanteil des Gesteins nimmt mit abnehmender Partikelgröße ab, der Massenanteil des Glases mit abnehmender Partikelgröße zu (Abbildung 4-33). Keramische Komponenten treten verstärkt im mittleren Partikelgrößenspektrum auf.

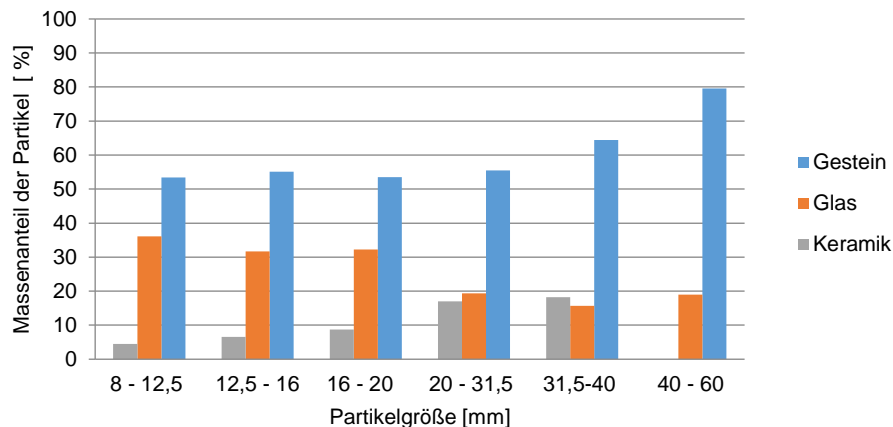


Abbildung 4-33: Verteilung der Hauptbestandteile des Schwergutaustrages

Der Gesamtfremdstoffgehalt des Schwergutaustrages 10 - 60 mm beträgt gemäß Abbildung 4-24 etwa 2,6 %. Innerhalb des Schwergutaustrages tritt der höchste Fremdstoffgehalt im mittleren Partikelgrößenbereich auf (Tabelle 4-14).

Tabelle 4-14: Fremdstoffgehalte im Schwergutaustrag, differenziert nach Siebschnitten

Siebschnitt [mm]	40 - 60	31,5 - 40	20 - 31,5	16 - 20	12,5 - 16	8 - 12,5
Fremdstoffgehalt [%] (Kunststoffe, Textilien, Holz, Sonstiges)	1,5	1,4	3,6	2,2	3,0	2,1

Abbildung 4-34 zeigt, dass der Gehalt organischer Substanz mit abnehmender Partikelgröße deutlich ansteigt. Insgesamt wird der Glühverlust des gesamten Schwergutaustrages durch die nicht vollständig abgetrennte Fraktion < 10 mm, die deutlich erhöhte Werte aufweist, (Kapitel 4.5.4) und weitere Fremdstoffe bestimmt. Eine weitgehende Abscheidung der Bodenfraktion < 10 mm stellt somit einen wesentlichen Verfahrensschritt dar, durch den die Qualitäten der erzeugten Stoffströme beeinflusst werden können.

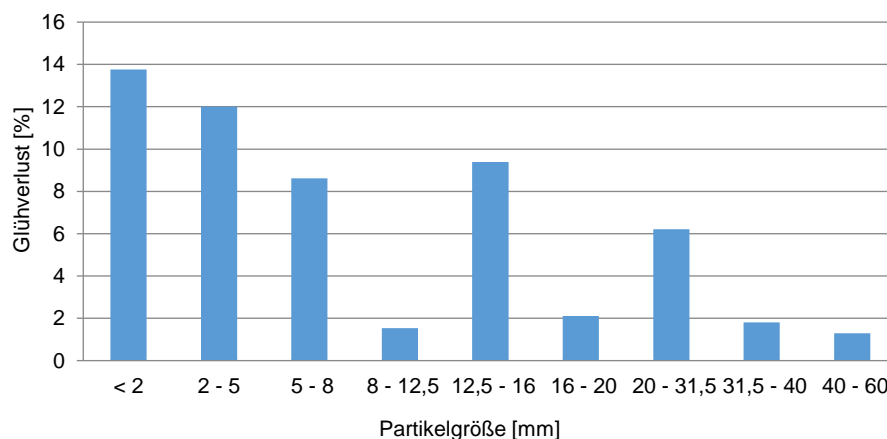


Abbildung 4-34: Glühverlust des Schwergutaustrages, differenziert nach Siebschnitten

Produktqualitäten

Umweltrelevante Grenz- und Richtwerte

Insgesamt halten die untersuchten Schwergutausträge 10 - 60 mm die Mindestanforderungen für eine stoffliche Verwertung entsprechend der Zuordnungskriterien der Klasse Z2 für Bauschutt ein (Tabelle 4-11). Eine Verwertung der Schwergutfraktion ist aus umweltrelevanter Sicht unter definierten Einbaubedingungen gemäß Anlage 8-3 möglich.

Feststoff

Hinsichtlich der Schadstoffbelastung im Feststoff formuliert die LAGA M 20 für Böden und Bauschutt lediglich Anforderungen für organischer Schadstoffe. Bezogen auf die Mindestanforderungen hinsichtlich der Zuordnungskriterien der Klasse Z2 weist der Schwergutaustrag nur geringe Schadstoffkonzentrationen im Feststoff auf. Die Schadstoffkonzentrationen der Kohlenwasserstoffe sowie der extrahierbare organisch gebundene Halogene entsprechen in Summe den Zuordnungskriterien der Klasse Z1.1 und liegen in einem engen Wertebereich.

Die Konzentrationen für die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe sowie die polychlorierten Biphenyle weisen einen deutlich größeren Wertebereich auf und entsprechen insgesamt den Zuordnungskriterien der Klasse Z1.2.

Eluat

Für die Elemente Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Quecksilber und Zink wurden Schadstoffkonzentrationen mit geringen Schwankungen ermittelt, welche die Zuordnungskriterien der Klasse Z0 deutlich unterschreiten beziehungsweise sogar unterhalb der jeweiligen analytischen Bestimmungsgrenze liegen. Die Kupferkonzentrationen hingegen weisen einen deutlich größeren Wertebereich auf und führen in einem Fall zur Zuordnung in die Klasse Z1.2.

Der gemessene Phenolindex entspricht in drei von vier Fällen den Zuordnungskriterien der Klasse Z0. In einem Fall werden die Zuordnungskriterien für die Klasse Z0 geringfügig überschritten, so dass hierbei eine Zuordnung in die Klasse Z1.2 erfolgt.

Die Salzkonzentrationen im Eluat werden über die elektrische Leitfähigkeit als Summenparameter sowie den Chlorid- und Sulfatgehalt bestimmt. Gegenüber den Mischproben weist die Probe aus der Versuchsdurchführung vom 27.05.2014 deutlich erhöhte Salzfrachten auf und entspricht insgesamt den Zuordnungskriterien der Klasse Z2. Ausschlaggebend dafür ist der Sulfatgehalt, da die gemessene Chloridkonzentration der Klasse Z1.2. und die elektrische Leitfähigkeit den Zuordnungskriterien der Klasse Z1.1 entspricht. Die Mischproben können hinsichtlich der Chlorid- und Sulfatkonzentration den Zuordnungswerten der Klasse Z1.1 und bezogen auf die elektrische Leitfähigkeit der Klasse Z0 zugeordnet werden.

Bautechnische Anforderungen

Der Schwergutaustrag 10 - 60 mm soll nachfolgend hinsichtlich seiner Verwertbarkeit im Straßenbau, speziell für die Anwendungsbereiche „Schichten ohne Bindemittel“ nach (TL-Gestein-StB 04, 2007) und „Erdbau“ nach (TL-BuB E-StB 09, 2009) bewertet werden. Für die Bewertung ist zunächst eine Kategorisierung des vorliegenden Stoffstromes notwendig. Der Schwergutaustrag wurde im Rahmen der nachfolgenden Bewertung gemäß TL-Gestein sowie TL BuB-E-StB als rezyklierte Gesteinskörnung eingeordnet. Unter rezyklierten Gesteinskörnungen werden gemäß TL-Gestein Gesteinskörnungen verstanden, welche durch die Aufbereitung anorganischen Materiales gewonnen werden, das zuvor als Baustoff eingesetzt war. Gemäß der Definition nach TL-Gestein handelt es sich damit bei dem Schwergutaustrag zunächst nicht um eine RC-Gesteinskörnung. Da mineralische Stoffströme aus Deponierückbaumaßnahmen in gesetzlichen Regelwerken jedoch nicht vertreten sind, dient die Zuordnung des hier gewonnenen Schwergutaustrages als RC-Gesteinskörnung als Hilfsmittel zur Bewertung der Qualität des Schwergutaustrages hinsichtlich der Anforderungen an RC-Gesteinskörnungen.

Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau

In Tabelle 4-15 sind die Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von RC-Gesteinskörnungen gemäß TL-Gestein und die im Prüflabor ermittelte stoffliche Zusammensetzung des Schwergutaustrages gegenübergestellt. Generell nicht verwendet werden dürfen nach TL-Gestein-StB 04 (2007) Gesteinskörnungen mit Anteilen pechhaltiger Bindemittel, bindige Böden sowie verwitterte beziehungsweise verwitterungsempfindliche Gesteine und ähnliche ungeeignete mineralische Stoffe.

Tabelle 4-15: Stoffliche Zusammensetzung des Schwergutaustrages nach TL-Gestein

Stoffgruppe [%]	Schwergut 10 - 60 mm	Soll nach TL-Gestein -StB 04/07, Anhang B
Beton	23,8	Keine Angaben
natürlich und industriell hergestellte Gesteinskörnung	42	Keine Angaben
Klinker, Ziegel, Steinzeug	16,1	< 30
Ausbauasphalt	0,3	< 30
Kalksandstein	1,4	< 5
Mineralische Leicht- und Dämmbau- stoffe	0,4	< 1
Fremdstoffe (Holz, Gummi, Folien, Kunststoff, Textilien u.a.m.)	1,7	< 0,2
Glas	9,4	Keine Angaben
Metalle	4,9	Keine Angaben

Der Schwergutaustrag 10 - 60 mm setzt sich vorwiegend aus natürlich und industriell hergestellten Gesteinskörnungen, sowie Beton, Klinker, Ziegel und Steinzeug zusammen. Keine Angaben werden seitens der TL-Gestein hinsichtlich der Komponenten Glas und Metall gemacht. Einen kritischen Parameter stellt der Fremdstoffgehalt im Schwergutaustrag dar. Dieser wird gegenüber den Anforderungen der TL-Gestein deutlich überschritten. Der Fremdstoffgehalt liegt in einem ähnlichem Wertebereich wie er auch im Rahmen der eigenen Sieb- und Sortieranalyse ermittelt wurde (Abbildung 4-24).

Nach TL-Gestein erfolgt die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung gemäß DIN EN 933-1 (2006), wobei das Material vor dem Siebvorgang zunächst zu waschen und zu trocknen ist. Die Siebanalyse erfolgt anschließend mit definierten Analysesieben. In der Abbildung 4-35 ist die nach TL-Gestein ermittelte Sieblinie und die Sieblinie aus den vorherigen Untersuchungen gegenübergestellt. Obwohl sich die Siebanalysen hinsichtlich der Probenaufbereitung unterscheiden zeigen die Ergebnisse eine gute Übereinstimmung.

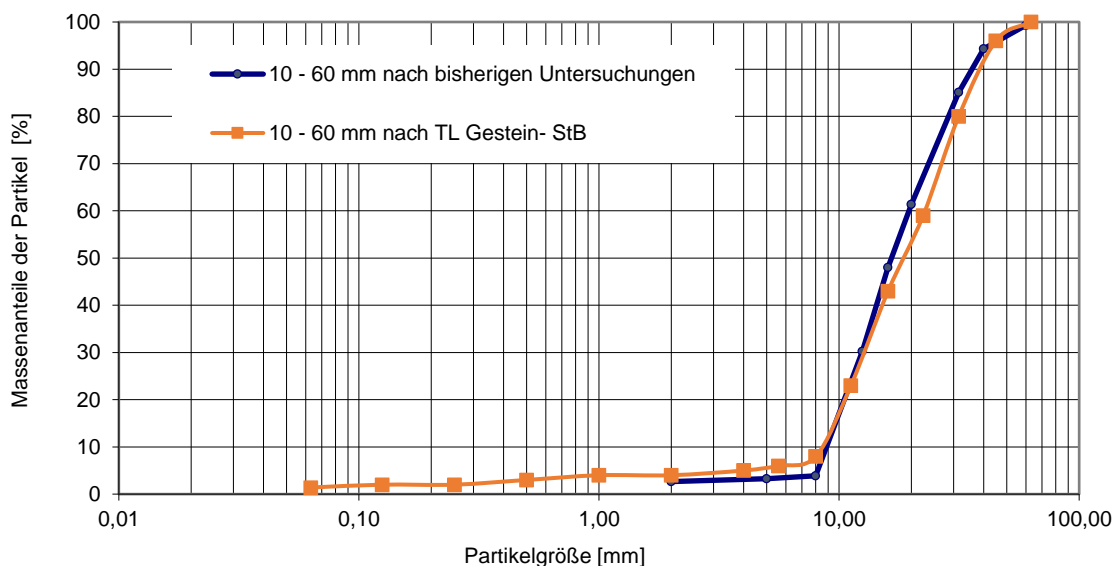


Abbildung 4-35: Sieblinie des Schwergutes nach TL-Gestein

Die Ergebnisse aus der bautechnischen Untersuchung des Schwergutaustrages sind in Tabelle 4-16 zusammengefasst und werden nachfolgend erläutert (siehe auch Anlage 8-4).

Tabelle 4-16: Bautechnische Eigenschaften des Schwergutaustrages nach TL-Gestein

Zeile	TL-Gestein- StB Abschnitts- Nr.	Eigenschaft	Frostschutz- schicht	Schotter-/ Kiestrag- schicht	Deck- schicht	Schwergut
1		Lieferkörnungen für Baustoffgemische nach TL SoB-StB 04 [mm]	0/2; 0/4; 0/5; 0/8; 0/11; 0/16; 0/22; 0/32; 0/45; 0/56; 0/63	0/32; 0/45; 0/56	0/8; 0/11; 0/16; 0/22; 0/32	10/60
2	2.1.1	stoffl. Kennzeichnung	ist anzugeben, stoffl. Zusammensetzung gemäß TL-Gestein, Anhang B sind einzuhalten			RC-Gesteinskör- nung
3	2.1.2	Rohdichte	ist anzugeben			2,55
4	2.2.2	Korngrößenverteilung				
5		Korngruppen/ Lieferkörnung	G _C 80/20 G _C 85/20			1
6		zusammengefasste Korngruppen	G _C 90/15 GT _C 20/15; GT _C 20/17,5			
7		Toleranz für Korngrößenverteilung	GT _A NR			
8	2.2.3	Gehalt an Feinanteilen				
9		Korngruppe/ Liefer- körnung 0/2 bis 0/5	f angegeben			-
10		Korngruppe/ Liefer- körnung 2/4 bis 32/63	f ₄		f angegeben	f _{1,4} (aus Sieblinie)
11	2.2.5	Kornform grober Gesteinskörnung	SI ₅₀ /FI ₅₀			SI ₅₀
12	2.2.6	Anteil gebrochener Oberflächen	C _{NR}	C _{90/3} ²	C _{NR}	C _{50/30}
13	2.2.9	Widerstand gegen Zertrümmerung	gesteinsbezogen gemäß Anhang A, TL-Gestein für RC-Baustoffe gilt SZ ₃₂			SZ ₃₂
14	2.2.14.1	Wasseraufnahme	W _{CM} = 0,5			3,1
15	2.2.14.2	Widerstand gegen Frostbeanspruchung	F ₄ ; F angegeben ³	F ₄ ; F angegeben ⁴	F ₄	f _{23,8}
16	2.2.7	Fließkoeffizient	-	-	-	-

¹ Keine Lieferkörnung gemäß TL-Gestein, deswegen keine Aussage möglich

² gilt nur für Schottertragschichten

³ Bei RC- Baustoff ist nach TL SoB- StB 04, Abschnitt 2.2.1.2.2 eine Überschreitung der Kategorie F₄ der TL-Gestein StB bis zu 10 % möglich

⁴ Bei RC- Baustoff ist nach TL SoB- StB 04, Abschnitt 2.3.1.2 eine Überschreitung der Kategorie F₄ der TL-Gestein StB bis zu 5 % möglich

Anhängig vom Verwendungszweck müssen Baustoffgemische vorgegebenen Lieferkörnungen entsprechen. Angaben dazu sind in den „Technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau“ TL-SoB-StB (2007), festgelegt. Hinsichtlich der bautechnischen Untersuchungen wurde der Schwergutaustrag analysiert, ohne dass zuvor eine konkrete Lieferkörnung hergestellt wurde.

Gemäß Zeile 2 ist die stoffliche Zusammensetzung der RC-Gesteinskörnung entsprechend dem „Merkblatt über die Wiederverwertung von mineralischen Baustoffen als Recycling-Baustoff im Straßenbau“ zu ermitteln und anzugeben. Die Stoffliche Zusammensetzung gemäß TL-Gestein ist dabei einzuhalten (Tabelle 4-15).

Die Rohdichte der Gesteinskörnung ist für den untersuchten Stoffstrom anzugeben (Zeile 3).

Die Parameter der Zeilen 4 bis 7 dienen der Charakterisierung der Korngrößenverteilung und der Kategorisierung der Korngruppe in Abhängigkeit des Über- und Unterkornanteiles. Die bautechnische Analyse der Schwergutaustrages 10 - 60 mm erfolgte im Rahmen der vorliegenden Arbeit zunächst vor dem Hintergrund, eine allgemeine Aussage hinsichtlich der Eignung des Massenstromes zur stofflichen Verwertung treffen zu können. Der Schwergutaustrag entspricht der Korngruppe 10/60 und damit keiner der in der TL-Gestein, aufgelisteten Lieferkörnungen. Eine Kombination benachbarter Korngruppen nach Tabelle 2, der TL-Gestein und die Kategorisierung dieser hinsichtlich des Über- und Unterkornanteiles gemäß Tabelle 3, TL-Gestein zum Beispiel für die Korngruppe 8/63, ist möglich. Diese Lieferkörnung ist jedoch aufgrund des fehlenden Anteils der Fraktion < 8 mm nicht für den direkten Einsatz in Schichten ohne Bindemittel geeignet (Zeile1), so dass im Rahmen der Analyse auf eine Auswertung und Kategorisierung der Korngruppen verzichtet wurde.

Entsprechend der Zeile 10 ist für grobe Gesteinskörnungen der Gehalt an Feinanteilen $< 0,063$ mm zu ermitteln. Für Frostschutzschichten sowie Schotter- und Kiestragschichten darf der Feinanteil nicht mehr als 4 % betragen. Bei der Anwendung der Gesteinskörnung als Deckschicht ist der Gehalt an Feinanteilen lediglich anzugeben. Der Schwergutaustrag weist für die untersuchte Korngruppe einen Feingutanteil von 1,4 % auf und hält damit die Mindestanforderungen ein.

Für grobe Gesteinskörnungen muss die geometrische Beschaffenheit der Partikel als Kornform- oder Plattigkeitskennzahl ermittelt und angegeben werden (Zeile11). Für die Anwendung von Gesteinskörnungen in Schichten ohne Bindemittel darf der Massenanteil ungünstig geformter Körner nicht mehr als 50 % betragen. Die Kornformkennzahl des Schwergutaustrages entspricht der Kategorie SI_{50} und hält damit die notwendigen Kriterien ein.

Anforderungen hinsichtlich dem Anteil gebrochener Oberflächen gelten lediglich für die Schottertragschichten (Zeile 12). Hierbei muss die Kategorie $C_{90/3}$ eingehalten werden, d.h. die Schicht muss zu 90 % aus vollständig und teilweise gebrochenen Körnern bestehen, wobei der Anteil der vollständig gerundeten Körner 3 % nicht übersteigen darf. Der Schwergutaustrag entspricht der Kategorie $C_{50/30}$ und besteht damit zu mindestens 50 % aus vollständig und teilweise gebrochenen Körnern und weist einen Anteil vollständig gerundeter Körner von maximal 30 % auf. Eine Anwendung des Schwergutaustrages im Bereich der Schottertragschichten ist damit ohne weitere Aufbereitung ausgeschlossen.

Der Widerstand gegen Zertrümmerung (Zeile 13) wird für grobe Gesteinskörnungen über den Schlagzertrümmerungswert oder den Los Angeles- Koeffizient ermittelt. Entsprechend Anhang A nach TL-Gestein gilt für Recycling-Baustoffe ein Schlagzertrümmerungswert der Kategorie SZ₃₂, welche ein Maß für den Gehalt an Feinanteilen der zertrümmerten Probe darstellt. Der Schlagzertrümmerungswert des Schwergutes entspricht der Kategorie SZ₃₂, womit der Schwergutaustrag einen ausreichenden Widerstand gegenüber Zertrümmerung aufweist.

Die Bestimmung der Widerstandsfähigkeit gegenüber Frostbeanspruchung (Zeile 14) erfolgt zunächst über die Wasseraufnahmefähigkeit der Gesteinskörnung. Die TL-Gestein fordert dabei unabhängig von der Gesteinsart oder deren Verwendungszweck eine Wasseraufnahme von $\leq 0,5 \%$ (Kategorie W_{cm} 0,5). Die Wasseraufnahme des Schwergutaustrages wurde mit 3,1 % ermittelt, womit die Anforderungen deutlich überschritten werden. Laut TL-Gestein ist die Bestimmung der Wasseraufnahme für poröse Gesteinskörnungen nicht geeignet. Da es sich bei dem Schwergutaustrag um ein Vielstoffgemisch handelt, kann keine Aussage hinsichtlich der Porosität getroffen werden, womit die Wasseraufnahme als geeignetes Bewertungskriterium für diesen Stoffstrom kritisch betrachtet werden muss.

Hält die Gesteinskörnung die Anforderungen hinsichtlich der Wasseraufnahme nicht ein, ist der Widerstand gegenüber Frostbeanspruchung (Zeile 15) zu ermitteln. Unabhängig vom Einsatzgebiet ist die Kategorie F₄ einzuhalten. Hierbei darf der Massenanteil der abgesplitterten Bestandteile nach zehn Frost-Tau-Wechseln nicht mehr als 4 % betragen. Beträgt der Massenanteil der abgesplitterten Bestandteile mehr als 4 %, so ist dieser anzugeben. Der Widerstand gegenüber Frostbeanspruchung entspricht bei dem Schwergutaustrag einem Masseverlust von 23,8 % und damit der der Kategorie f_{23,8}, womit die Anforderungen nach TL-Gestein deutlich überschritten werden. Die hohe Wasseraufnahme beziehungsweise Verwitterungsempfindlichkeit kann dabei vorwiegend auf die Anwesenheit von Beton oder Mörtel zurückgeführt werden (TL-BuB E-StB 09, 2009; Rodrigues et al., 2013).

Der Fließkoeffizient (Zeile 16) ist ausschließlich für feine Gesteinskörnungen zu bestimmen und wurde im Rahmen der bautechnischen Analyse des Schwergutaustrages nicht ermittelt.

Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus

Die technischen Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau definieren stoffspezifische erdbautechnische und umweltrelevante Anforderungen an Böden und Baustoffe zur Herstellung von Erdbauwerken im Bereich Straßenbau. Die Klassifizierung der Böden und Baustoffe erfolgt gemäß DIN EN ISO 14688-1 (2013), die Klassifikation für bautechnische Zwecke der Böden und Baustoffe erfolgt gemäß DIN 18196 (TL-BuB E-StB 09, 2009).

Hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung gelten für die Böden und Baustoffe die Anforderungen gemäß TL-Gestein. Zusätzlich darf der Massenanteil an Ausbauasphalt nicht mehr

als 10 % betragen, weiterhin ist der Anteil der Partikel < 4 mm anzugeben (TL-BuB E-StB 09, 2009). Bis auf den Gehalt an Fremdstoffen werden von dem Schwergutaustrag die geforderten Kriterien hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung eingehalten (siehe Tabelle 4-15).

Gemäß TL BuB E-StB, 2009 ist der Boden beziehungsweise Baustoff zu benennen, wobei es sich bei dem Schwergutaustrag 10 - 60 mm um einen grobkörnigen Boden in Form von Mittel- und Grobkies handelt.

Für grobkörnigen Böden wird die Bodenklassifizierung nur nach der Korngrößenverteilung vorgenommen (DIN 18196, 2011). Anhand der Ungleichförmigkeitskennzahl ist dabei zu bestimmen, ob es sich um einen eng, weit, oder intermittierend gestuften Kies handelt. Die Ungleichförmigkeitskennzahl C_U wird über die nachfolgende Formel ermittelt.

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad \text{Formel(4-1)}$$

C_U = Ungleichförmigkeitskennzahl [-]

d_{60} = Massenanteil des Siebdurchganges < 60 mm

d_{10} = Massenanteil des Siebdurchganges < 10 mm

Anhand der ermittelten Sieblinie (Abbildung 4-30) ergibt sich für den Schwergutaustrag 10 – 60 mm eine Ungleichförmigkeitskennzahl von 5,55, womit es sich gemäß, DIN 18196 (2011) um einen eng gestuften Kies handelt. Anhand dieses Wertes können die Anwendungsbiete für eng gestuften Kies im Erdbau des Straßenbaus ermittelt werden (Tabelle 4-17).

Tabelle 4-17: bautechnische Zwecke eng gestufter Kiese (DIN 18196, 2011)²

Baugrund für Gründungen	Baustoff für				
	Erd- und Bastraßen	Straßen- und Bahndämme	Dichtungen	Stützkörper	Dränagen
+	-	+	--	+	++

--ungeeignet - wenig geeignet 0 mittelmäßig geeignet + gut geeignet ++ sehr gut geeignet

Gemäß TL BuB E- StB 2009 bestehen für Recyclingbaustoffe Anforderungen hinsichtlich der Plastizität und dem Wassergehalt. Nach DIN 18196 (2011) entfällt die Bestimmung plastischer Eigenschaften, da es sich bei dem Schwergutaustrag 10 - 60 mm um einen grobkörnigen Boden handelt. Nach TL BuB E- StB sollte der Wassergehalt für Recyclingmaterial im Einbauzustand bei 97% Proctordichte liegen.

² „Wiedergegeben mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Maßgebend für das Anwenden der DIN-Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.“

Anhaftungen

Der Schwergutaustrag weist einen Massenanteil eluierbarer Anhaftungen von 16,7 % auf und ist vergleichbar mit dem Massenanteil der Anhaftungen im Aufgabegut (Kapitel 4.1).

Gegenüber dem Glühverlust des Schwergutaustrages von im Mittel 3,9 % (Anlage 8-22) weisen die Anhaftungen mit 8,5 % (Anlage 8-29) einen höheren Gehalt organischer Substanz auf und beeinflussen damit die Qualität des Schwergutaustrages. Im Vergleich zu den Anhaftungen des Aufgabegutes (Abbildung 4-13) weisen Anhaftungen des Schwergutaustrages einen deutlich geringeren Gehalt organischer Substanz auf.

Die TOC- Gehalte der Anhaftungen des Schwergutaustrages nehmen einen Massenanteil von etwa 2 % (Anlage 8-29) ein und entsprechen dem TOC-Gehalt der Anhaftungen der Kiesfraktion aus dem Aufgabegut (Abbildung 4-14).

Die Ergebnisse der Schwermetallanalyse im Feststoff sind in der Tabelle 4-18 dargestellt. Als Vergleichsgröße sind zusätzlich die Schwermetallgehalte aus dem Aufgabegut sowie die Orientierungswerte für die Bewertung von schadstoffbelastetem Bauschutt vor der Aufbereitung (Tabelle II. 1.4-4 nach LAGA M 20 (2012)) aufgelistet. Die Anhaftungen des Schwergutaustrages weisen gegenüber den Vergleichsgrößen eine deutlich geringere Schadstoffbelastung auf, eine Ausnahme bildet das Element Zink. Insgesamt ist damit die Schwermetallkonzentration der Schwergutanhaftungen als unkritisch zu betrachten und nicht qualitätsbestimmend.

Tabelle 4-18: Schwermetallgehalte der Anhaftungen des Schwergutaustrages

	Cadmium	Mangan	Nickel	Eisen	Kupfer	Blei	Zink
	mg/kg						
Anhaftungen Schwergutaustrag	u. BG	111	u. BG	13889	111	111	611
Aufgabegut ¹	u. BG	-	71	-	289	271	920
LAGA ²	3	-	200	-	200	300	500

u.BG = Messwerte liegen unterhalb der Bestimmungsgrenze von 3,33 mg/kg

¹ Analyseergebnisse aus der Untersuchung des Aufgabegutes < 25mm, < 60 mm und 10 - 60 mm, angegeben als Medianwert

² Orientierungswerte für die Bewertung von schadstoffbelasteten Gebäuden, Bauteilen oder Bauschutt vor der Aufbereitung [LAGA M 20, 2003, Tabelle II 1.4.4]

Fazit

Bezüglich der umweltrelevanten Anforderungen weisen die Schwergutausträge im allgemeinen geringe Schadstoffgehalte im Feststoff als auch im Eluat auf, siehe auch (Friedmann und Zollner, 1995). Die Zuordnung der untersuchten Proben in die Klasse Z1.2 resultiert aus erhöhten PAK und EOX Konzentrationen. Eine Beeinflussung der Schadstoffkonzentration im Feststoff durch das Aufbereitungsverfahren erfolgt nicht, da es sich dabei um nicht wasserlösliche bzw. mobilisierbare Schadstoffe handelt (LFU). Bezogen auf die Eluatparameter erfolgt die Zuordnung des Schwergutaustrages infolge erhöhter Salzkonzentrationen in die Klasse Z1.2. Insgesamt entspricht der Schwergutaustrag den Zuordnungskriterien der Klasse Z1.1 bis Z2 nach LAGA M 20 (2012) beziehungsweise der Klasse RC 1 bis RC 3 nach TL-Gestein. Eine Steigerung der Produktqualität des Schwergutaustrages, insbesondere bezüglich der Salzfracht, ist theoretisch möglich da, es sich hierbei zumindest teilweise um abschlämbbare beziehungsweise wasserlösliche Komponenten handelt.

Der Schwergutaustrag 10 - 60 mm entspricht, mit Ausnahme der Fremdstoffgehalte, den Anforderungen eines RC-Baustoffes gemäß TL-Gestein. Eine Abscheidung enthaltener Glas- und Metallkomponenten ist bei Bedarf mit etablierter Verfahrenstechnik, zum Beispiel mittels optischer Sortieranlagen oder Metallabscheidern möglich. Die Verwertbarkeit der Metalle ist abhängig von deren Metallqualitäten denkbar, wobei deponiebürtige Metalle überwiegend durch mindere Produktqualitäten gekennzeichnet sind (Krüger et al., 2016; Kaartinen et al., 2013). Eine wesentliche Voraussetzung für die stoffliche Verwertung des Schwergutaustrages liegt in der Reduktion der Fremdstoffanteile. Mögliche Ansätze zur Reduktion des Fremdstoffgehaltes bietet beispielsweise die Optimierung des nassmechanischen Aufbereitungsverfahrens und die Erhöhung der Siebgüte im Rahmen der Vorabsiebung. Weiterhin kann der Fremdstoffanteil im Schwergutaustrag selbst durch den Einsatz optischer Sortieranlagen oder Windsichter reduziert werden.

Die wesentlichen Anforderungen an grobe Gesteinskörnungen hinsichtlich der Geometrie und Festigkeiten werden von dem Schwergutaustrag eingehalten. Einen kritischen Parameter stellt der Widerstand gegenüber Frostbeanspruchung dar, welcher die Anforderungen nach TL-Gestein deutlich überschreitet. Der geringe Widerstand gegenüber Frostepfindlichkeit lässt auf einen hohen Anteil verwitterungsempfindlicher Bestandteile zurückführen. Mit dem Abscheiden von Gips oder Beton aus dem Schwergutaustrag, zum Beispiels mittels optischer Sortieranlagen, kann der Anteil verwitterungsempfindlicher Bestandteile gesenkt werden. Der Stoffstrom könnte somit einer höherwertigen Verwertung im Straßenbau, zum Beispiel zur Herstellung von „Schichten ohne Bindemittel“ eingesetzt werden.

Mögliche Einsatzgebiete für den Schwergutaustrag im Bereich Erdbau stellen, unter Einhaltung der Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung, der Einsatz als Baugrund für Gründungen oder der Einsatz als Baustoff für Dränagen dar.

Der Anteil der eluierbaren Anhaftungen am Schwergutaustrag beträgt etwa 17 %. Die Anhaftungen weisen dabei eine geringe Schadstoffbelastung hinsichtlich der Schwermetallgehalte sowie organischer Substanzen auf. Der vergleichsweise hohe Massenanteil der Anhaftungen lässt sich auf die Porosität des Schwergutaustrages zurückführen.

Infolge der vergleichsweise geringen Schadstoffbelastung beeinflussen die Anhaftungen des Schwergutaustrages nur geringfügig die Umweltverträglichkeit des Stoffstromes. Aufgrund des hohen Massenanteiles der Anhaftungen können diese sich jedoch, in Abhängigkeit des Tongehaltes, auf die Wasseraufnahmekapazität und damit auf die bautechnischen Anforderungen auswirken. Eine detaillierte Untersuchung dieses Sachverhaltes war jedoch nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

Im Rahmen der großtechnischen Umsetzung nassmechanischer Aufbereitungsverfahren findet üblicherweise eine Vorkonditionierung des zu behandelnden Stoffstromes, zum Beispiel mittels Schwertwäscher statt (siehe Kapitel 5). Im Rahmen dieses Aufbereitungsschrittes ist es möglich, den Massenanteil der eluierbaren Anhaftungen im Schwergutaustrag zu senken und die Produktqualität zu erhöhen.

4.5.2 Feingutaustrag aus der Aufbereitung des Aufgabegutes 10 - 60 mm

Der Feingutaustrag wurde während der nassmechanischen Aufbereitung über den Hydrozyklon aus dem Prozesswasserkreislauf ausgetragen. Aufgrund seiner geringen Partikelgröße stellt er optisch einen homogenen Stoffstrom dar welcher mit einem Sand vergleichbar ist (Abbildung 4-36).

Der Wassergehalt des Feingutstromes ist infolge der Schwerkraft bedingten Entwässerung des Feingutaustrages abhängig von dem Zeitpunkt der Probenahme. Das analysierte Material stammt aus weitestgehend entwässerten Rückstellproben und weist Wassergehalte im Bereich von etwa 18 – 20 % auf (Anlage 8-28).



Abbildung 4-36: Feingutaustrag als Frischsubstanz

Gegenüber dem Schwergutaustrag weist der Feingutaustrag mit einem Glühverlust im Bereich von 4,6 – 5,7 % einen geringfügig höheren Anteil organischer Substanz auf (Anlage 8-22). Der enge Wertebereich bestätigt die homogene stoffliche Zusammensetzung des Feingutaustrages.

Sieb- und Sortieranalysen

Abbildung 4-37 zeigt die Sieblinie des Feingutaustrages infolge kombinierter Sieb-Schlamm-analyse. Die Bestimmung der Partikel < 0,02 mm erfolgte mittels Aräometerverfahren.

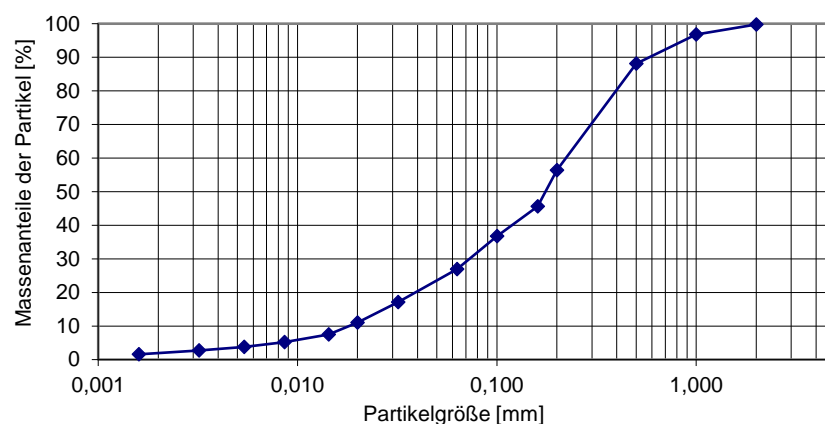


Abbildung 4-37: Sieblinie des Feingutaustrages

Bedingt durch den Versuchsaufbau und die in der Nasssetzmaschine und den Entwässerungs-sieben verwendeten Siebböden weist der Feingutaustrag eine obere Partikelgröße von 2 mm auf und besteht zu ca. 56 % aus Partikeln < 0,2 mm. Gemäß Tabelle 1, DIN EN ISO 14688-1 (2013) entspricht der Feingutaustrag aufgrund der Partikelgrößenverteilung (Abbildung 4-38) einem Fein/ Mittelsand mit Schluffanteil (Kurzzeichen FSa/MSa).

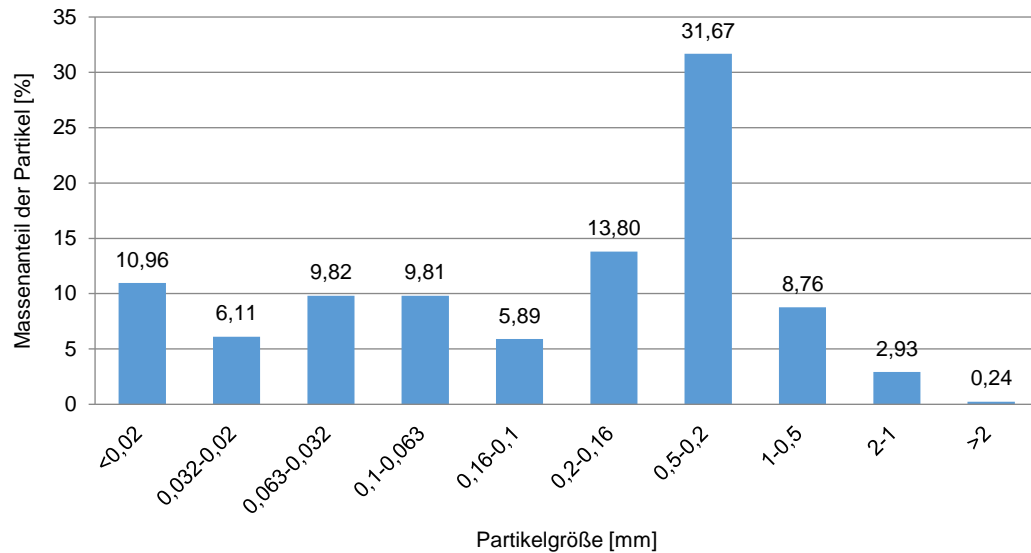


Abbildung 4-38: relative Häufigkeit der Massenanteile des Feingutaustrages

Abbildung 4-39 zeigt, dass der Feingutaustrag mit Ausnahme der Partikel < 0,02 mm beziehungsweise 0,5 mm bis 1 mm, geringe Anteile organischer Substanz enthält.

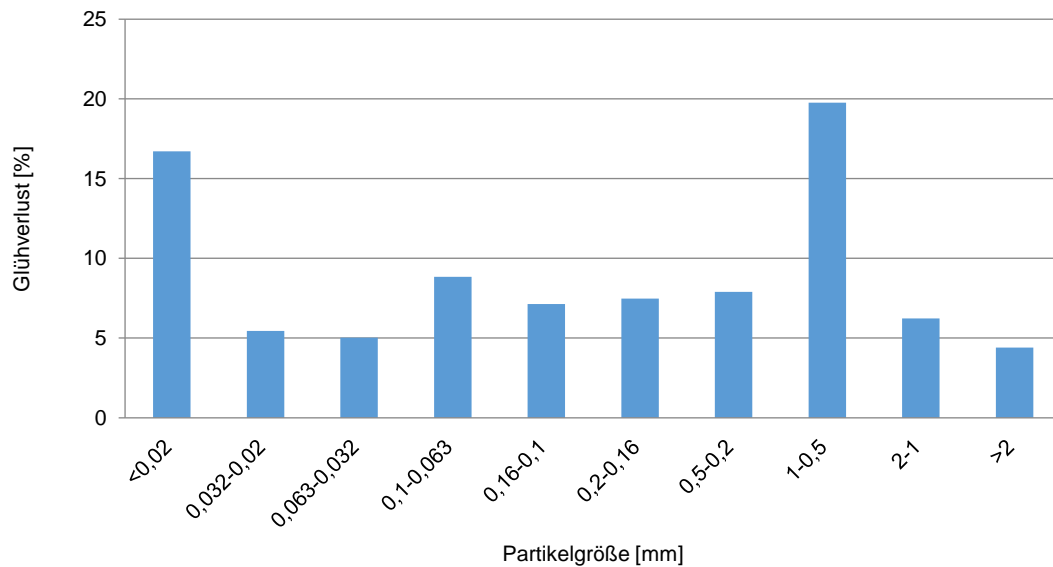


Abbildung 4-39: Glühverlust des Feingutaustrages, differenziert nach Siebschnitten

Produktqualitäten

Umweltrelevante Grenz- und Richtwerte

Die Feingutausträge aus der Aufbereitung der Fraktion 10 - 60 mm (Tabelle 4-12) entsprechen den Zuordnungskriterien der Klasse Z2 nach LAGA M 20 (2012) womit eine Verwertung dieser Fraktionen aus umweltrelevanter Sicht unter Berücksichtigung definierter Einbaubedingungen (Anlage 8-3) möglich ist.

Feststoff

Die Schadstoffkonzentrationen der Kohlenwasserstoffe entsprechen in vier von sechs Fällen den Zuordnungskriterien der Klasse Z1.2. Die Konzentrationen für die extrahierbaren organisch gebundenen Halogene und der Polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe entsprechen in Summe den Zuordnungskriterien der Klasse Z1.2. Die Schadstoffkonzentrationen für die polychlorierten Biphenyle weisen erheblich Schwankungen im Wertebereich auf und entsprechen insgesamt den Zuordnungskriterien der Klasse Z2.

Eluat

Der Feingutaustrag weist im Allgemeinen niedrige Schwermetallkonzentrationen im Eluat auf. Die Konzentrationen an Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Nickel und Quecksilber liegen für alle Inputmaterialien in einem engen Wertebereich, der die Zuordnungskriterien der Klasse Z0 deutlich unterschreitet, beziehungsweise unterhalb der Nachweisgrenze der Bestimmungsmethode liegt. Bei Kupfer und Zink liegen leicht erhöhte Konzentrationen vor, die zur Einstufung in die Klasse Z1.2 führen.

Der gemessene Phenolindex erfüllt unabhängig von den verwendeten Aufgabegütern die Kriterien der Klasse Z0 beziehungsweise Klasse Z1.1.

Die Feingutausträge aus der Aufbereitung des Aufgabegutes < 60 mm und 10 - 60 mm halten die Mindestanforderungen der Klasse Z2 ein. Ebenso wie bei dem Schwergutaustrag wird die Salzkonzentration im Wesentlichen durch die Sulfatkonzentration bestimmt. Chlorid hingegen tritt unabhängig vom Aufgabegut nur in geringen Konzentrationen auf, wobei sich die einzelnen Aufgabegüter nur geringfügig auf die Höhe der Konzentrationen auswirken. Die Materialien halten alle die Zuordnungskriterien der Klasse Z1.1 ein.

Bautechnische Anforderungen

Der Feingutaustrag wurde entsprechend der Vorgehensweise beim Schwergutaustrag als rezyklierte Gesteinskörnung definiert und damit gemäß den Anforderungen für rezyklierte Gesteinskörnungen nach TL-Gestein bewertet.

Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau

In Tabelle 4-19 wird die im Prüflabor ermittelte stoffliche Zusammensetzung des Feingutaustrages den Anforderungen von RC-Gesteinskörnungen nach TL-Gestein gegenübergestellt. Der Feingutaustrag besteht zu überwiegendem Anteil aus natürlich und industriell hergestellten Gesteinskörnungen sowie Beton und Glas. Der Fremdstoffgehalt stellt den kritischen Parameter dar und liegt mit einem Massenanteil von 2,5 % um ein Vielfaches über dem maximal zulässigen Wert der TL-Gestein.

Tabelle 4-19: Stoffliche Zusammensetzung des Feingutaustrages nach TL-Gestein

Stoffgruppe [Ma. -%]	Feingutaustrag	Soll nach TL-Gestein -StB 04/07, Anhang B
Beton	16,1	Keine Angaben
natürlich und industriell hergestellte Gesteinskörnung	58,3	Keine Angaben
Klinker, Ziegel, Steinzeug	4,3	< 30
Ausbauasphalt	0,7	< 30
Kalksandstein	0,2	< 5
Mineralische Leicht- und Dämmbaustoffe	0	< 1
Fremdstoffe (Holz, Gummi, Folien, Kunststoff, Textilien u.a.m.)	2,5	< 0,2
Glas	17,1	Keine Angaben
Metalle	0,8	Keine Angaben

In der Abbildung 4-40 ist die nach TL-Gestein ermittelte Sieblinie gemäß DIN EN 933-1 (2006) und die Sieblinie in Anlehnung an DIN 18123 gegenübergestellt. Obwohl sich die Siebanalysen hinsichtlich der Probenaufbereitung unterscheiden (siehe auch Kapitel 4.5.1) konnten nahezu identische Ergebnisse erzielt werden. Die Siebanalyse dient der Charakterisierung der Partikelgrößenverteilung entsprechend Tabelle 4-20.

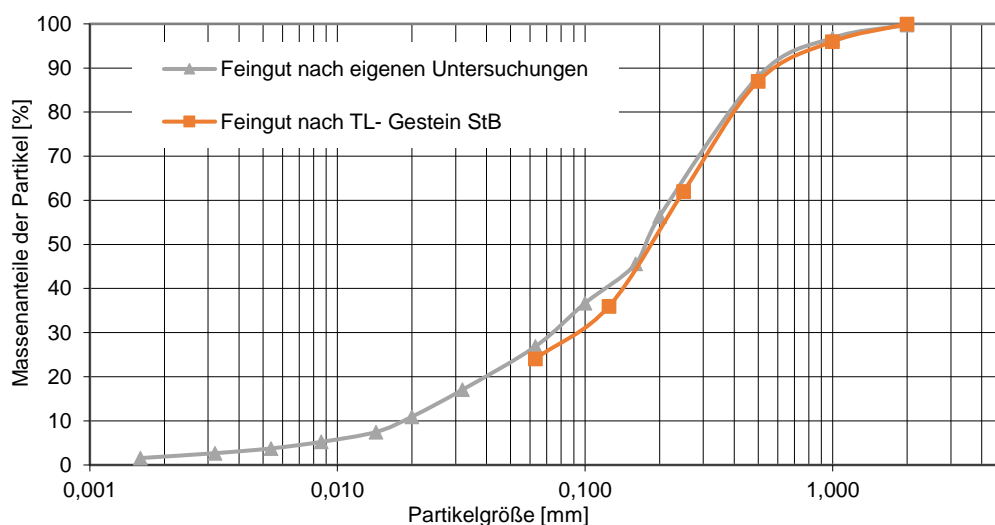


Abbildung 4-40: Sieblinie des Feingutaustrages nach TL-Gestein

Die Ergebnisse der bautechnischen Untersuchung des Feingutaustrages sind in Tabelle 4-20 zusammengefasst und die einzelnen Kriterien werden nachfolgend erläutert.

Tabelle 4-20: Bautechnische Eigenschaften des Feingutaustrages nach TL-Gestein

Zeile	TL-Gestein- StB Abschnitts- Nr.	Eigenschaft	Frostschutz- schicht	Schotter-/ Kiestrag- schicht	Deckschicht	Feingut
1		Lieferkörnungen für Baustoffgemische nach TL SoB-StB 04 [mm]	0/2; 0/4; 0/5; 0/8; 0/11; 0/16; 0/22; 0/32; 0/45; 0/56; 0/63	0/32; 0/45; 0/56	0/8; 0/11; 0/16; 0/22; 0/32	0/2
2	2.1.1	stoffl. Kennzeichnung	ist anzugeben, stoffl. Zusammensetzung gemäß TL-Gestein, Anhang B sind einzuhalten			RC-Baustoff
3	2.1.2	Rohdichte	ist anzugeben			2,54
4	2.2.2	Korngrößenverteilung				
5		Korngruppen/ Lieferkörnung	G _F 80 G _F 85			G _F 85
6		zusammengefasste Korngruppen	G _C 90/15 GT _C 20/15; GT _C 20/17,5			
7		Toleranz für Korngrößenverteilung	GT _A NR			
8	2.2.3	Gehalt an Feinanteilen				
9		Korngruppe/ Liefer- körnung 0/2 bis 0/5	f ₃ ; f ₁₆ ; f _{angegeben}			f ₂₄ (aus Siebli- nie)
10		Korngruppe/ Liefer- körnung 2/4 bis 32/63	f ₄		f _{angegeben}	
11	2.2.5	Kornform grober Gesteinskörnung	SI ₅₀ /FI ₅₀			-
12	2.2.6	Anteil gebrochener Oberflächen	C _{NR}	C _{90/3} ¹	C _{NR}	-
13	2.2.9	Widerstand gegen Zertrümmerung	gesteinsbezogen gemäß Anhang A, TL-Gestein für RC-Baustoffe gilt SZ ₃₂			-
14	2.2.14.1	Wasseraufnahme	W _{CM} = 0,5			3,2
15	2.2.14.2	Widerstand gegen Frostbeanspruchung	F ₄ ; F _{angegeben} ²	F ₄ ; F _{angegeben} ³	F ₄	f _{6,7}
16	2.2.7	Fließkoeffizient	E _{CS} angeben	E _{CS} angeben	E _{CS} angeben	E _{CS} 35

¹ gilt nur für Schottertragschichten

² Bei RC- Baustoff ist nach TL SoB- StB 04, Abschnitt 2.2.1.2.2 eine Überschreitung der Kategorie F₄ der TL-Gestein StB bis zu 10 % möglich

³ Bei RC- Baustoff ist nach TL SoB- StB 04, Abschnitt 2.3.1.2 eine Überschreitung der Kategorie F₄ der TL-Gestein StB bis zu 5 % möglich

C_{NR}- keine Anforderung

F = Fine = Feine Gesteinskörnung

Anhängig vom Verwendungszweck müssen Baustoffgemische vorgegebenen Lieferkörnungen entsprechen. Angaben dazu sind in den „Technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau“

TL SoB- StB (Zeile 1) festgelegt. Gemäß der Siebanalyse (Abbildung 4-40) entspricht der Feingutaustrag der Lieferkörnung 0/2 mm.

Die stoffliche Zusammensetzung der RC-Gesteinskörnung (Zeile 2) ist entsprechend dem „Merkblatt über die Wiederverwertung von mineralischen Baustoffen als Recycling-Baustoff im Straßenbau“ zu ermitteln und anzugeben (siehe Tabelle 4-19).

Die Rohdichte der Gesteinskörnung (Zeile 3) ist anzugeben und beträgt $2,54 \text{ Mg/m}^3$.

Mit einem Überkornanteil der oberen Korngröße $D = 2 \text{ mm}$ von weniger 15 % entspricht der Feingutaustrag der Lieferkörnung 0/2 der Kategorie G_{F85} (Zeile 4 - 7).

Gemäß Tabelle 4, (TL-Gestein-StB 04, 2007) gelten für feinkörnige Korngruppen/ Lieferkörnungen zusätzliche Anforderungen hinsichtlich der Toleranzen des Siebdurchganges (Zeile 7). Der Hersteller der Gesteinskörnung muss gemäß TL-Gestein die typische Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung aufzeichnen, und falls gefordert, angeben. Eine Bewertung des Feingutaustrages hinsichtlich der Toleranz der Korngrößenverteilung gemäß Zeile 7, Tabelle 4-20 erfolgte im Rahmen dieser Arbeit nicht.

Für feine Gesteinskörnungen ist der Gehalt an Feinanteilen $< 0,063 \text{ mm}$ zu ermitteln und ab einem Feinkornanteil $< 16 \%$ anzugeben (Zeile 10). Dieser beträgt für den Feingutaustrag entsprechend der Abbildung 4-40 ca. 27 %. Gesteinskörnungen mit einem Feinanteil von mehr als 3 % sind gemäß Tabelle 6, (TL-Gestein-StB 04, 2007) hinsichtlich der Qualität der Feinanteile zu untersuchen. Bei dem Einsatz der Gesteinskörnung im Bereich Schichten ohne Bindemittel entfällt dieser Nachweis.

Die Kornform, der Anteil gebrochener Oberflächen sowie der Widerstand gegen Zertrümmerung (Zeile 11 - 13) ist nur für grobe Gesteinskörnungen zu ermitteln und damit nicht Bestandteil dieser Auswertung.

Der Feingutaustrag besitzt ein Wasseraufnahmevermögen von 3,2 % und überschreitet damit den geforderten Grenzwert von 0,5 % deutlich (Zeile 14). Die Ursache für das hohe Wasseraufnahmevermögen des Feingutaustrages lässt sich auf die Anwesenheit poröser Komponenten, wie beispielsweise Beton, sowie von quellfähigen Tonen oder auch organischer Komponenten wie zum Beispiel Holz zurückführen (TL-Gestein-StB 04, 2007).

Der für den Feingutaustrag ermittelte Widerstand gegenüber Frostbeanspruchung ergab einen Massenverlust von 6,7 % und entspricht der Kategorie $f_{6,7}$. Die Anforderungen an die Frostsicherheit werden damit von dem Feingutaustrag nicht eingehalten. Entsprechend der TL-BuB E-StB 09 (2009) ist eine hohe Verwitterungsempfindlichkeit vorwiegend auf die Anwesenheit von Beton oder Mörtel zurückzuführen.

Entsprechend Tabelle 10 der TL-Gestein-StB 04 (2007) ist für feine Gesteinskörnungen weiterhin der Fließkoeffizient zu ermitteln und anzugeben (Zeile 16). Der Feingutaustrag weist gemäß bautechnischer Untersuchung einen Fließkoeffizient der Kategorie ECS₃₅ auf.

Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus

Mit Ausnahme des Gehaltes an Fremdstoffen hält der Feingutaustrag die Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung ein (Tabelle 4-19).

Die Bodenklassifizierung für bautechnische Zwecke erfolgt anhand der Korngrößenverteilung gemäß DIN 18196, beruhend auf der DIN EN ISO 14688-1. Ausgehend von dem Massenanteil des Feinkornes < 0,063 mm von 27 % und einem Massenanteil der Fraktion < 2 mm mit mehr als 60 % entspricht der Feingutaustrag gemäß Tabelle 4, DIN 18196 einem gemischtkörnigen Boden in Form eines Sand- Schluff- Gemisches mit der Kurzbezeichnung SU*. Die daraus resultierenden Verwertungsmöglichkeiten des Feingutaustrages im Boden- und Erbau sind in der Tabelle 4-21 aufgelistet.

Tabelle 4-21: Bodenklassifizierung von Sand- Schluff- Gemischen mit hohem Feinanteil für bautechnische Zwecke (DIN 18196, 2011)³

Bautechnische Eignung von Sand- Schluff- Gemischen mit hohem Feinanteil					
Baugrund für Gründungen	Baustoff für				
	Erd- und Baustraßen	Straßen- und Bahndämme	Dichtungen	Stützkörper	Dränagen
0	- 0	-0	+0	--	--
	-- ungeeignet	- wenig geeignet	0 mittelmäßig geeignet	+ gut geeignet	++ sehr gut geeignet

Bezüglich der Anwendung von Recyclingbaustoffen im Straßenbau nach TL-BuB E StB bestehen weiterhin Anforderungen hinsichtlich der Plastizität und dem Wassergehalt.

Die Bestimmung der Plastizität nach DIN 18122 erfolgte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht. Eine Bewertung der plastischen Eigenschaften des Feingutaustrages erfolgte vereinfachend mittels Knetversuch nach DIN EN ISO 14688 – 1, wonach der Feingutaustrag eine nur geringe Plastizität aufwies.

Der Wassergehalt der rezyklierten Gesteinskörnung hat dem für den Einbau und die Verdichtung erforderlichem Wassergehalt zu entsprechen und sollte im Bereich von 97 % des Wassergehaltes bei der Proctordichte liegen (TL-BuB E-StB 09, 2009).

³ „Wiedergegeben mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Maßgebend für das Anwenden der DIN-Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.“

Sandwäsche

Die Ergebnisse der Untersuchungen bestätigen die Erfahrungen anderer Autoren, z.B. Rodrigues et al. (2013), dass der Fremdstoffgehalt, der hohe Anteil feinkörniger Partikel $< 0,063$ mm sowie die hohen Sulfatgehalte im Eluat kritische Parameter hinsichtlich der Verwertbarkeit des mineralische Stoffströme darstellen. Eine Möglichkeit die Produktqualität des Feingutaustrages zu steigern, stellt die Sandwäsche als etabliertes Aufbereitungs-verfahren dar. Die Aufbereitung des Feingutaustrages mittels Sandwäscher wurde dazu im Labormaßstab unter definierten Bedingungen simuliert (Anlage 8-30), wobei 10 kg Feingutaustrag als Mischprobe und 20 l Leitungswasser in einer Acrylsäule mit einem Durchmesser von 400 mm und einer Höhe 800 mm mit einem Wendelrührer bei konstanter Drehzahl 10 Minuten gerührt. Anschließend wurde das mit Schwebstoffen angereicherte Wasser bei anhaltender Rührbewegung mittels Schlauchpumpe aus dem Behälter abgepumpt. Dieser Vorgang wurde zweimalig durchgeführt und der in der Säule sedimentierte Feingutaustrag analysiert.

Unter die Kategorie der Fremdstoffe zählen gemäß TL-Gestein organische Komponenten wie beispielsweise Kunststoffe, Holz, Gummi und Textilien, welche gegenüber mineralischen Komponenten eine geringeren spezifische Dichte aufweisen. Aufgrund dieser Dichtedifferenz kann durch den Einsatz von Sandwaschverfahren der Fremdstoffgehalt im Feingutaustrag beeinflusst werden (Abbildung 4-41). Durch den Waschprozess im Labormaßstab konnte der Glühverlust und damit der Fremdstoffgehalt im Feingutaustrag signifikante gesenkt werden.

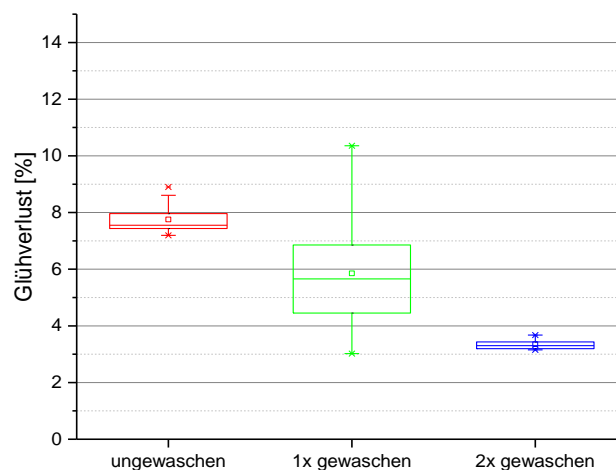


Abbildung 4-41: Reduktion des Glühverlustes des Feingutaustrages infolge Sandwäsche

Der Sulfatgehalt ist aufgrund umweltrelevanter Anforderungen, aber auch aus bautechnischer Sicht zu begrenzen. Sulfat kann zur Versauerung von Böden und des Grundwassers beitragen sowie zur Schädigungen an Betonelementen führen, korrosionsbeschleunigend auf Eisen wirken und Gipstreiben verursachen (Bahadir und Angerhöfer, 2000). Als wesentlicher Eintragspfad von Sulfat in Deponat wird vor allem Gips angesehen (Rodrigues et al., 2013). Sulfat weist zumeist eine hohe Wasserlöslichkeit auf (Hauptmann, 1998), so dass eine Reduktion

des Sulfatgehaltes durch eine Sandwäsche erreicht werden kann, siehe auch (Wei-hong et al., 2004). In der nachfolgenden Abbildung 4-42 und Abbildung 4-43 ist dazu die elektrische Leitfähigkeit sowie der Sulfatgehalt im Eluat für den Feingutaustrag im Ausgangszustand sowie im gewaschenen Zustand gegenübergestellt. Erwartungsgemäß kann durch den Waschprozess die elektrische Leitfähigkeit sowie der Sulfatgehalt im Eluat des Feingutaustrages signifikant gesenkt und damit die Produktqualität des Feingutaustrages gesteigert werden.

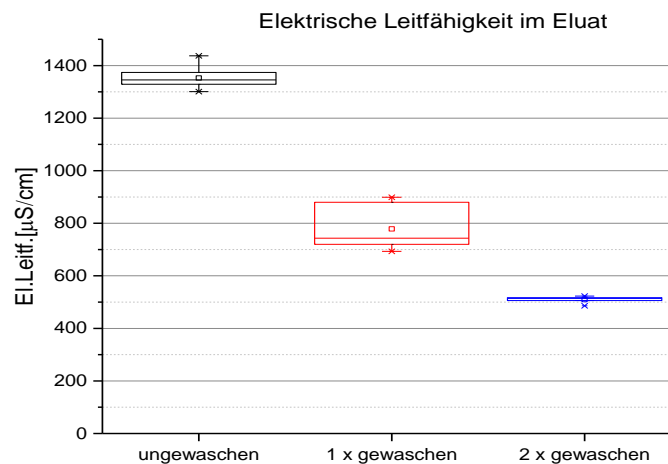


Abbildung 4-42: Einfluss der Sandwäsche auf den Feingutaustrag am Beispiel der elektrischen Leitfähigkeit im Eluat

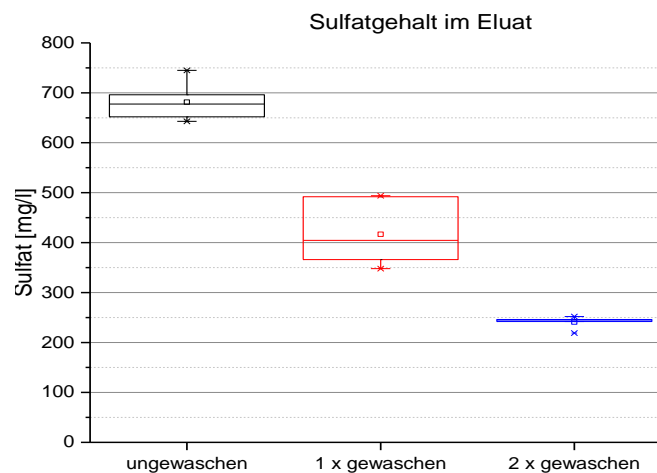


Abbildung 4-43: Einfluss der Sandwäsche auf den Feingutaustrag am Beispiel des Sulfatgehaltes im Eluat

Der Einfluss der Sandwäsche auf den Gehalt der Feinanteile < 0,063 mm wird anhand der Sieblinien für den Feingutaustrag im Ausgangszustand sowie im gewaschenen Zustand verdeutlicht (Abbildung 4-44 und Abbildung 4-45).

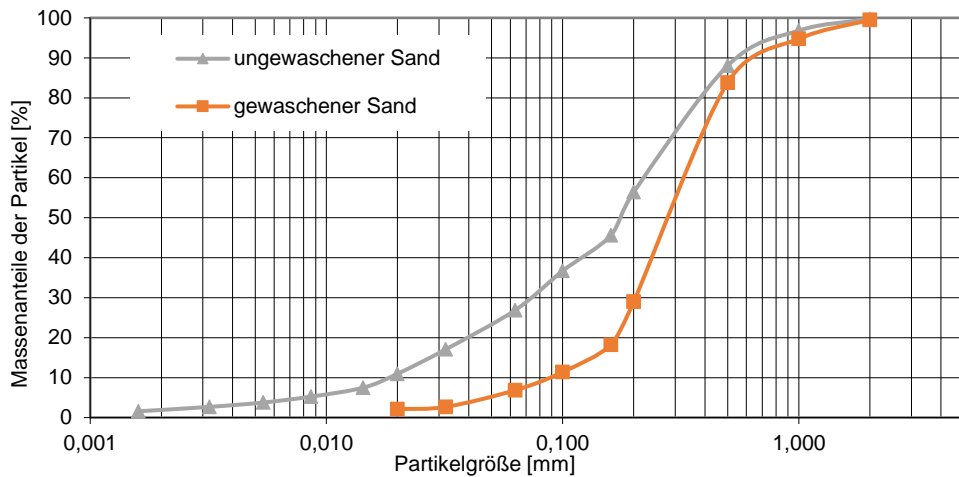


Abbildung 4-44: Sieblinie des Feingutaustrages (gewaschen/ ungewaschen)

Die Sandwäsche führt zu einer Reduktion der Feinanteile $< 0,063$ mm von ursprünglich etwa 27 % auf ca. 7 %. Der Feingutaustrag entspricht damit der Kategorie f_{16} (Tabelle 4-20). Für feine Gesteinskörnungen gelten im Bereich Schichten ohne Bindemittel zunächst keine Anforderungen an den Gehalt an Feinanteilen. Soll der Einsatz des Feingutaustrages im Bereich der Betonherstellung erfolgen, ist der Gehalt an Feinanteilen auf höchstens 3 % zu reduzieren (TL-Gestein-StB 04, 2007).

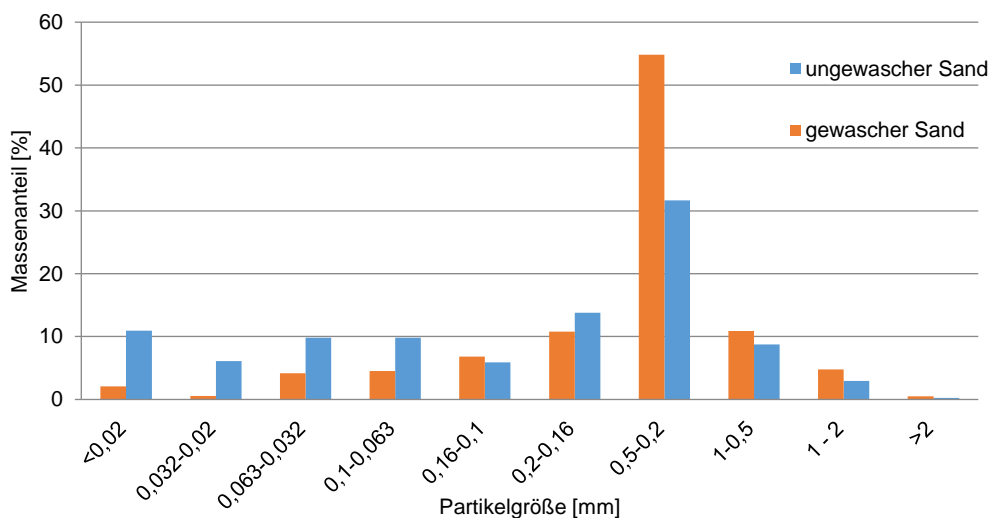


Abbildung 4-45: Massenanteil des Feingutaustrages (gewaschen/ ungewaschen)

Anteil magnetisierbarer Komponenten

Im Rahmen der Stoffstromanalyse wurde festgestellt, dass der Feingutaustrag wesentliche Anteile magnetisierbarer Komponenten enthält, wobei davon auszugehen ist, dass es sich um eine Mischung aus Metallen, Metalloxiden und anderen mineralischen Bestandteilen handelt (Quaghebeur et al., 2013). Vergleichbare Beobachtungen konnten auch durch die RWTH Aachen bei der Aufbereitung feiner deponiebürtiger Stoffströme gemacht werden (Hee, 2013). Der Massenanteil der magnetisierbaren Komponenten im Feingutaustrag beträgt etwa 2 % und

wurde im Labormaßstab mittels Permanentmagnet aus einer getrockneten Mischprobe mit der Gesamtmasse von 1 kg (Anlage 8-31) ermittelt. Die Untersuchung der abgeschiedenen magnetisierbaren Komponenten mittels Stereolupe bestätigt die Anwesenheit von Eisenspänen und metallisch glänzenden Kugelstrukturen (Abbildung 4-46).

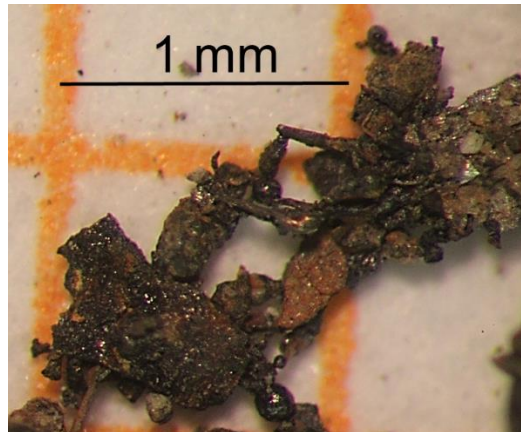


Abbildung 4-46: Magnetisierbare Komponenten im Feingutaustrag (50-fach vergrößert)

Der Aufschluss der magnetisierbaren Komponenten mittels Königswasser bestätigt die Literaturangaben (Quaghebeur et al., 2013), wobei die magnetisierbare Fraktion nicht aus dem reinen Element Eisen sondern Eisenverbindungen besteht (Abbildung 4-47). Alle weiteren dargestellten Metalle treten lediglich in Spuren auf.

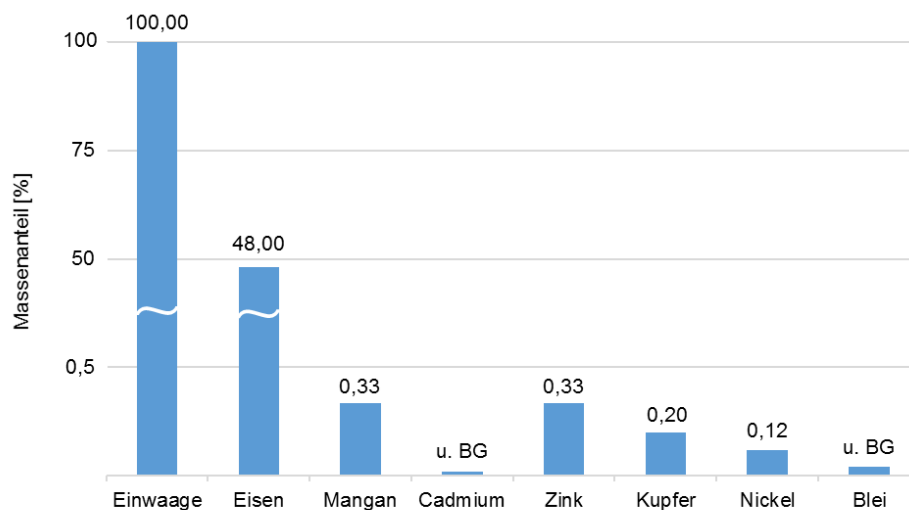


Abbildung 4-47: Eisenanteil der magnetisierbaren Komponenten des Feingutaustrages

Fazit

Hinsichtlich der umweltrelevanten Anforderungen gemäß LAGA M 20 (2012) weisen die untersuchten Proben des Feingutaustrages im Allgemeinen geringe Schadstoffgehalte im Feststoff sowie geringe Konzentrationen an Schwermetallen und organischen Schadstoffen im Eluat auf. Insgesamt entsprechen die Feingutausträge aus der Aufbereitung des Aufgabegutes

< 60 mm beziehungsweise 10 - 60 mm den Zuordnungskriterien der Klasse Z2 nach LAGA M 20 (2012) beziehungsweise der Klasse RC 3 nach TL-Gestein- StB. Einen kritischen Parameter stellt der Sulfatgehalt dar. Da es sich bei dem Sulfat um eine wasserlösliche Komponente handelt, kann die Produktqualität des Feingutaustrages durch eine weitere Aufbereitung, zum Beispiel mittels Sandwäscher, gesteigert werden.

Die durch die TL-Gestein vorgegebenen bautechnischen Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung werden von dem Feingutaustrag, bedingt durch den erhöhten Fremdstoffanteil, nicht eingehalten. Weiterhin konnten die Kriterien an die Frostsicherheit in Form der Wasseraufnahmekapazität und des Widerstandes gegenüber der Frostbeanspruchung nicht vollständig eingehalten werden. Eine Verwertung des Feingutaustrages im Bereich des Straßenbaus für Schichten ohne Bindemittel ist ohne weitere Aufbereitungsschritte nicht realistisch. Eine mögliche Form der Aufbereitung stellt die Sandwäsche als etabliertes Verfahren dar. Durch die Aufbereitung des Feingutaustrages mittels Sandwäscher kann eine Reduktion des Fremdstoffgehaltes sowie der Feinanteile < 0,063 mm, hierzu zählen beispielsweise quellfähige Tone, erfolgen.

Die direkte Verwertung des Feingutaustrages im Bereich Erdbau scheidet zunächst aufgrund des vorhandenen Fremdstoffgehaltes aus. Weiterhin wirkt sich der hohe Feinanteil der Fraktion < 0,063 mm negativ auf die bautechnische Eignung des Feingutaustrages aus. Durch eine Reduktion der Feinanteile, z.B. mittels Sandwäsche, auf unter 15%, ergeben sich für den Feingutaustrag gemäß DIN 18196, Tabelle 4 erweiterte Verwertungsmöglichkeiten im Bereich Erdbau.

Mit den im Labormaßstab durchgeführten Versuchen zur Sandwäsche konnte der Nachweis erbracht werden, dass die Produktqualität des Feingutaustrages hinsichtlich der ermittelten kritischen Parameter durch eine weitere Aufbereitung positiv beeinflusst werden kann. Die Sandwäsche stellt ein etabliertes Verfahren zur Stoffstromaufbereitung dar. Am Markt werden dazu Aggregate für unterschiedlichste Anwendungen und Zielsetzungen angeboten, weshalb der Einsatz von Sandwäschern zur Aufbereitung von deponiebürtigen feinmineralischen Stoffströmen grundlegend geeignet erscheint.

Der Anteil der magnetisierbaren Komponenten im Feingutaustrag nimmt im Mittel einen Massenanteil von etwa 2 % ein. Ist eine Abscheidung der magnetisierbaren Komponenten aus dem Feingutaustrag notwendig, kann dies beispielsweise mittels Überbandmagneten erfolgen. Die Abbauwürdigkeit von Eisenerz liegt mit einer Eisenkonzentration von 35 - 45 % deutlich über dem Gehalt magnetisierbarer Komponenten im Feingutaustrag (Krüger et al., 2016). Eine Abscheidung dieses Stoffstromes mit dem Ziel der Verwertung ist, auch unter Berücksichtigung der Materialqualität, nicht zu erwarten.

4.5.3 Leichtgutaustrag 10 - 60 mm

Der Leichtgutaustrag setzt sich überwiegend aus heizwertreichen Komponenten wie Kunststoffen und Holz zusammen (Abbildung 4-48). Charakteristisch für deponiestämmige Kunststoffe sind die Anhaftungen an der Partikeloberfläche. Zudem kann aufgrund von Alterungsprozessen im Deponiekörper eine Veränderung der stofflichen Eigenschaften gegenüber Kunststoffen aus Frischmüll beobachtet werden (Zhou et al., 2014; Chiemchaisri et al., 2010; Krüger et al., 2016).



Abbildung 4-48: Leichtgutaustrag als Frischsubstanz

Der Wassergehalt des Leichtgutaustrages ist abhängig von der stofflichen Zusammensetzung und der Entwässerbarkeit des Stoffstromes durch das Entwässerungssieb, und damit stark abhängig von dem Zeitpunkt der Probennahme.

Der mittlere Wassergehalt beträgt ca. 28 % (Anlage 8-28) und ist aufgrund der Materialeigenschaften erwartungsgemäß deutlich höher als im Schwer- und Feingutaustrag. Die Versuche zeigen, dass die im Rahmen der Versuchsdurchführung verwendeten Entwässerungssiebe für mineralische Stoffströme, weniger jedoch für die Entwässerung größerer Massenströme flächiger Partikel, wie bspw. dem Leichtgut, geeignet sind.

Der Wertebereich der Glühverluste (Anlage 8-22) liegt in einem breiten Bereich von ca. 43 – 68 % (im Mittel ca. 53 %) und lässt sich auf die inhomogene stoffliche Zusammensetzung des Leichtgutaustrages zurückführen.

Sieb- und Sortieranalysen

Der Leichtgutaustrag stellt aufgrund des hohen Anteiles flächiger Partikel einen Stoffstrom dar, der mit Siebanalysen nur bedingt beschrieben werden kann. Die Siebanalyse des Leichtgutaustrages 10 - 60 mm beschränkte sich daher auf die Siebschnitte 40 mm, 20 mm und 10 mm (Abbildung 4-49).

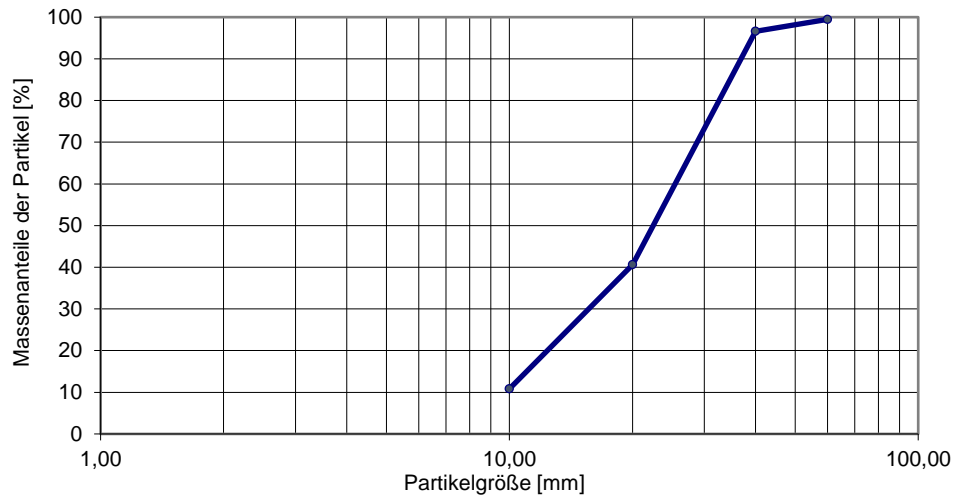


Abbildung 4-49: Sieblinie des Leichtgutaustrages

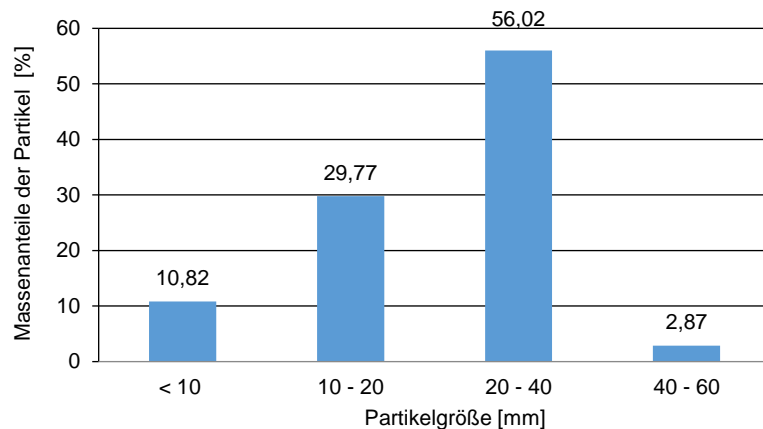


Abbildung 4-50: Relative Häufigkeit der Massenanteile des Leichtgutaustrages

Der Leichtgutaustrag setzt sich zu ca. 86 % aus Komponenten mit der Partikelgröße zwischen 10 und 40 mm zusammen (Abbildung 4-50). Einen nur geringen Massenanteil mit etwa 3 % nimmt die Fraktion mit der Partikelgröße 40 – 60 mm ein. Die Fraktion < 10 mm stellt innerhalb des Leichtgutaustrages einen Fremdstoff dar welcher trotz Vorkonditionierung des Aufgabegutes einen Massenanteil von 10 % einnimmt.

Die Ermittlung der stofflichen Zusammensetzung des Feingutaustrages erfolgte mittels Sortieranalyse. Die mittlere Zusammensetzung des gesamten Leichtgutaustrages 10 - 60 mm ist in der Abbildung 4-51 zusammenfassend dargestellt, der Fremdstoffanteil des Leichtgutaustrages 10 - 60 mm beträgt 22,9 %.

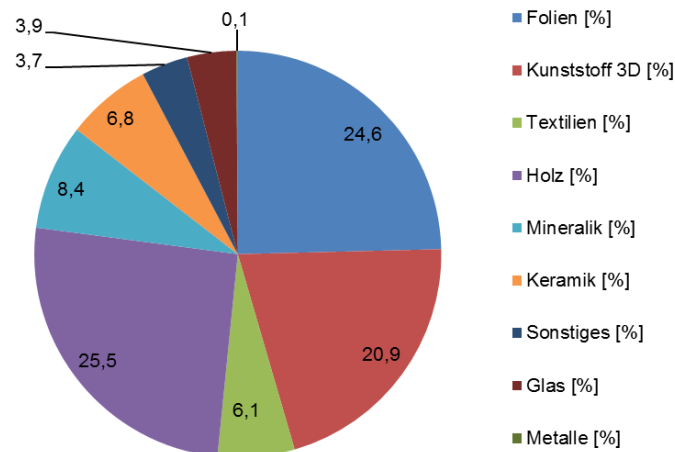


Abbildung 4-51: Stoffliche Zusammensetzung des Leichtgutaustrages

In der nachfolgenden Abbildung ist die stoffliche Zusammensetzung des Leichtgutaustrages, differenziert nach den Siebschnitten der Siebanalyse dargestellt. (Abbildung 4-52).

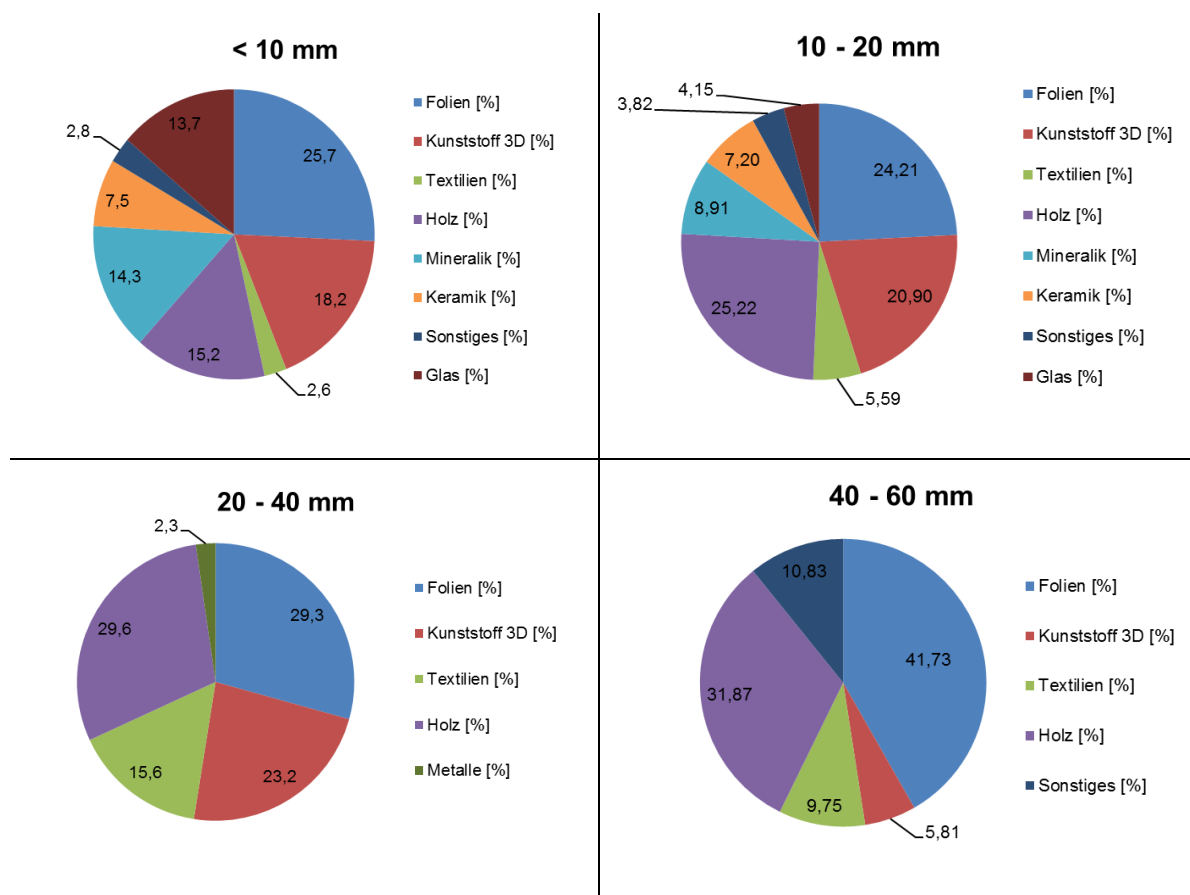


Abbildung 4-52: Stoffliche Zusammensetzung des Leichtgutaustrages, differenziert nach Siebschnitten

Im Wesentlichen besteht der Leichtgutaustrag aus Folien, dreidimensionalen Kunststoffen und Holz. In Abhängigkeit der betrachteten Siebschnitte ergeben sich unterschiedliche Fremdstoffgehalte in Form von inerten Bestandteilen und sonstigen Komponenten (Tabelle 4-22).

Die Fraktion 40 - 60 mm weist mit etwa 10 % einen hohen Anteil an Fremdstoffen auf, welcher jedoch aufgrund des geringen Massenanteiles der Fraktion vernachlässigbar ist. Den niedrigsten Fremdstoffgehalt enthält die in Bezug auf die Masse am größten vertretene Fraktion 20 - 40 mm. In der Tendenz steigt der Fremdstoffgehalt innerhalb des Leichtgutaustrages mit abnehmender Partikelgröße. Aufgrund des hohen Fremdstoffgehaltes von ca. 38 % stellt die Fraktion < 10 mm einen kritischen Parameter hinsichtlich der thermischen Verwertung dar.

Tabelle 4-22: Fremdstoffgehalte im Leichtgutaustrag, differenziert nach Siebschnitten

Siebschnitte [mm]	40 - 60	20 - 40	10 - 20	< 10
Fremdstoffgehalt [%] (Mineralik, Keramik, Sonstiges, Glas, Metalle)	10,8	2,3	24,1	38,3

Der Leichtgutaustrag weist unabhängig vom Siebschnitt einen Glühverlust in vergleichbarer Höhe auf (Abbildung 4-53). Die Fraktion < 10 mm weist einen unerwartet hohen Glühverlust auf, so dass hierbei von einem möglichen Messfehler ausgegangen werden muß.

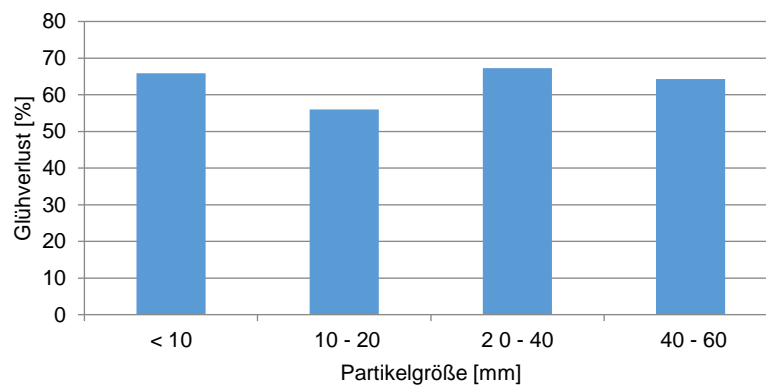


Abbildung 4-53: Glühverlust des Leichtgutaustrages, differenziert nach Siebschnitten

Anforderungen und Eignung thermische Behandlung und energetische Verwertung

Potenzielle Verwertungsmöglichkeiten für den Leichtgutaustrag stellen die energetische Verwertung in EBS- oder Zementkraftwerken dar. In der Tabelle 4-23 sind die entsprechenden Anforderungen an das Material für verschiedene thermische Anlagen zusammengefasst. Neben der energetischen Verwertung des Leichtgutaustrages wird der Vollständigkeit halber auch die thermische Beseitigung in Müllverbrennungsanlagen (MVA) berücksichtigt. Das Material wird im Folgenden in Hinblick auf die einzelnen Anforderungen bewertet.

Tabelle 4-23: Produktqualitäten des Leichtgutaustrages im Vergleich zu den Anforderungen bei der energetischen Verwertung (Krüger et al., 2016)

Zeile	Parameter	Einheit	Leichtgut 10 - 60 mm			MVA	EBS-Kraftwerk	Zement-kraftwerk
			Probe I	Probe II	Probe III	Rostfeuerung	Rostfeuerung	Niederkalorik
						Wertebereich	Wertebereich	Wertebereich
1	Korngröße	mm	-	-	-	< 1000x1000x100 < 2500x2500x200 ⁸	< 300 ¹ , < 500x100x100	<25x25x1, < 300x300x20 ⁶
2	Schüttdichte	kg/m ³	-	-	-	keine Vorgaben	150 - 300 ¹	300 - 500
3	Gesamt-wasser	% OS	22,4	24,7	31,5	60	25 - 40	10 - 25
4	Aschegehalt bei 550 °C		18,5	17,5	17,7	30 ⁹	22 - 36	10 - 30
5	Chlor-gesamt		3,7	0,75	1	4	2,5	0,8
6	Schwefel-gesamt		2,52	1,95	1,57	3	1,7	0,5
7	Brennwert (Ho)	MJ/kg OS	18,8	21,2	17,6	-	-	-
8	Heizwert (Hu) ⁷		16,97	19,16	15,61	8 - 17	10 - 18	13 - 17
9	Heizwert (Hu)	MJ/kg TS	22,57	26,22	23,91	-	-	-
10	Antimon	mg/kg TS	36	380	98	2500	850	150
11	Arsen		5,4	4,6	4,5	1000	30	13
12	Blei		1020	226	458	5000 ¹⁰	2800	300
13	Cadmium		32	24	5,4	100	107	9
14	Chrom		118	88	85	4000	9200	185
15	Kobalt		6	5	6	-	-	12
16	Kupfer		4110	4420	2030	15000	37100	500
17	Mangan		164	111	151		850	600
18	Nickel		33	37	57	2500	400	100
19	Quecksilber		1,1	0,78	0,57	50	7	1,2
20	Thallium		< 0,2	< 0,2	< 0,2	1000	40	2
21	Vanadium		17	16	11	100	180	25
22	Zinn		50	196	41	1000	400	70
23	PAK		16,4 ¹¹	-	-	5000	-	-
24	PCB		1,53 ¹¹	-	-	50	-	-
25	Störstoffe	% OS	-	-	-	-	Fe-/ NE- Metalle < 0,5 ¹	-

¹ Angaben für Energies- Anlagen⁶ Gilt für Anlagen mit Vorbrennkammer⁷ Angaben für analysefeuchten Zustand⁸ für Anlagen mit Vorzerkleinerer⁹ Aschegehalt < 30 % möglich, unterliegen jedoch Sonderprüfung¹¹ Werte aus LAGA Analyse für Leichtgut vom 27.05

Thermische Beseitigung

Sämtliche Anforderungen hinsichtlich der thermischen Beseitigung in einer MVA werden von den Proben des Leichtgutaustrages eingehalten (Tabelle 4-23). Bezüglich des Energiegehaltes weist der Leichtgutaustrag einen Heizwert im oberen Verarbeitungsspektrum von Müllverbrennungsanlagen auf. Die gemessenen Schwermetallkonzentrationen liegen deutlich unterhalb der für Müllverbrennungsanlagen angegebenen Konzentrationsbeschränkungen, dies gilt gleichermaßen für die organischen Schadstoffe.

Energetische Verwertung in EBS-Kraftwerken

EBS-Kraftwerke sind wahlweise mit einer Rost- beziehungsweise Wirbelschichtfeuerung ausgestattet. In der Praxis dominieren die rostgefeuerten Anlagen, da bei diesen im Gegensatz zum Wirbelschichtverfahren, weniger aufwendig aufbereitete Abfallströme eingesetzt werden können (Krüger et al., 2016).

Die Anforderungen an die Korngröße (Zeile 1) werden als Folge der im Rahmen der Vorkonditionierung des Deponates gewählten Siebschnitte von dem Leichtgutaustrag eingehalten. Die Ermittlung der Schüttdichte (Zeile 2) erfolgte für die Proben des Leichtgutaustrages im Rahmen der Materialanalyse nicht, so dass für diesen Parameter keine Aussage getroffen werden kann.

Die Wasser- sowie Aschegehalte (Zeile 4 und 5) des Leichtgutaustrages entsprechen den Anforderungen zur Verwertung in EBS-Kraftwerken.

Bezüglich des Chlor- und Schwefelgehaltes (Zeile 5 und 6) kommt es teilweise zu Überschreitungen der Anforderung. Die Parameter Chlor und Schwefel stellen damit im Rahmen der Verwertung des Leichtgutaustrages in EBS-Kraftwerken einen kritischen Parameter dar.

Der Energiegehalt des Leichtgutaustrages (Zeile 8) entspricht den Anforderungen an die Verwertung in EBS-Kraftwerken. Der Leichtgutaustrag weist einen Energiegehalt auf, welcher dem oberen Verarbeitungsspektrum für EBS-Kraftwerke entspricht.

Die Schwermetallkonzentrationen des Leichtgutaustrages (Zeile 9 - 21) stellen für die Verwertung in EBS-Kraftwerken keinen kritischen Parameter dar. Die entsprechenden Anforderungen werden für alle Schwermetalle eingehalten beziehungsweise deutlich unterschritten.

Der Massenanteil der in dem Leichtgutaustrag enthaltenen Metalle wurde im Rahmen der Sortieranalyse (siehe Abbildung 4-51) zu 0,1 % bestimmt und stellt somit keinen kritischen Parameter dar.

Energetische Verwertung in Zementkraftwerken

Eine hochwertige Form der Verwertung von Ersatzbrennstoffen stellt die energetische Verwertung in Zementwerken dar, da hierbei fossile Brennstoffe substituiert werden können (Krüger et al., 2016). Die Voraussetzung dafür ist eine hohe und gleichbleibende Brennstoffqualität, entsprechend den Anforderungen an qualitätsgesicherte Sekundärbrennstoffe (SBS®) nach RAL-GZ 724, welche durch eine intensive Vorkonditionierung des Ersatzbrennstoffes sichergestellt werden soll.

In der Tabelle 4-24 sind die Schwermetallgehalte der Proben des Leichtgutaustrages den Anforderungen der Gütesicherung nach RAL-GZ 724 gegenübergestellt, wobei sich die zulässige Konzentration an Schwermetallen auf den Energiegehalt des Brennstoffes beziehen. Die Umrechnung dazu erfolgt im Anhang (Anlage 8-32). Sowohl der Median (50 % Perzentil- Wert) als auch der 80 % Perzentil Wert stellen statistische Werte dar, wobei 50 % bzw. 80 % aller gemessenen Werte kleiner diesem Wert sein müssen. Weitere Parameter wie beispielsweise die Materialfeuchte, der Heizwert sowie der Gehalt an Asche, Chlor und Kupfer sind entsprechend der Gütesicherung zu dokumentieren.

Tabelle 4-24: Qualitäten des Leichtgutaustrages im Vergleich zu den zulässigen Werten der RAL-GZ 724

Parameter	Einheit	Leichtgut 10 - 60 mm			Schwermetallgehalte nach RAL-GZ 724 ⁴	
		Probe I	Probe II	Probe III	Medianwert	„80 % Perzentil“ Wert
Cadmium	mg/ MJ TS	1,42	0,92	0,23	0,25	0,56
Quecksilber		0,05	0,03	0,02	0,038	0,075
Thallium		< 0,0088	< 0,0076	< 0,0083	0,063	0,13
Arsen		0,24	0,18	0,19	0,31	0,81
Kobalt		0,27	0,19	0,25	0,38	0,75
Nickel		1,46	1,41	2,38	5	10
Antimon		1,60	14,49	4,10	3,1	7,5
Blei		45,19	8,62	19,16	12	25
Chrom		5,23	3,36	3,55	7,8	16
Mangan		7,27	4,23	6,32	16	31
Vanadium		0,75	0,61	0,46	0,63	1,6
Zinn		2,22	7,48	1,71	1,9	4,4

Die Elemente Thallium, Arsen, Kobalt, Nickel, Chrom und Mangan stellen hinsichtlich der Gütekriterien unkritische Parameter dar, da diese sowohl die Medianwerte als auch die 80% Perzentil-Werte einhalten. Kritisch zu betrachten sind vor allem die Elemente Cadmium, Anti-

⁴ Die Auszugsweise Wiedergabe der Tabelle 3 der Gütesicherung, RAL- GZ erfolgt mit Genehmigung von RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V. © Alle Rechte- auch Übersetzung in andere Sprachen- liegen bei RAL.

mon, Blei, Quecksilber und Zinn. Die erhöhten Konzentrationen dieser Metalle liegen zumindest in einer der untersuchten Probe über dem zulässigen Medianwert und teilweise überschreiten die Konzentrationen den 80 % Perzentil- Wert deutlich.

Ergänzend zu der Bewertung der Schwermetallgehalte des Leichtgutaustrages gemäß den Gütekriterien der RAL-GZ 724 wird dieser Stoffstrom mit den aus Literaturquellen ermittelten Anforderungen verglichen (Tabelle 4-23). Aufgrund des Energiegehaltes des Leichtgutaustrages (Zeile 8, Tabelle 4-23) erfolgt der Vergleich für den Einsatz des Leichtgutaustrages als niederkalorische Fraktion.

Der Leichtgutaustrag hält die Anforderungen an die Korngröße (Zeile 1, Tabelle 4-23) zumindest für Anlagen, die mit Vorbrennkammer ausgestattet sind, ein. Die Schüttdichte (Zeile 2, Tabelle 4-23) des Leichtgutaustrages wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht bestimmt.

Die maximal zulässigen Wassergehalte werden mit der Ausnahme einer Probe eingehalten. Die Aschegehalte (Zeile 4 und 5, Tabelle 4-23) entsprechen den Anforderungen.

Der Einsatz des Leichtgutaustrages ist in Zementkraftwerken aufgrund der ermittelten Chlor- und Schwefelgehalte (Zeile 5 und 6, Tabelle 4-23) kritisch zu betrachten. Die ermittelten Konzentrationen überschreiten bis auf eine Ausnahme deutlich die maximal zulässigen Werte.

Aufgrund des Energiegehaltes ist der Leichtgutaustrages (Zeile 8, Tabelle 4-23) für eine Verwertung in Zementkraftwerken geeignet.

Die Schwermetallkonzentrationen des Leichtgutaustrages (Zeile 9 bis 21, Tabelle 4-23) stellen für die Verwertung in Zementkraftwerken einen kritischen Parameter dar. Insbesondere die Konzentrationen der Elemente Cadmium, Antimon, Blei, Quecksilber und Zinn überschreiten die Anforderungen (siehe auch Tabelle 4-24). Gemäß RAL-GZ 724 ist der Kupfergehalt zu dokumentieren, dieser überschreitet den angegebenen Wertebereich deutlich und stelle damit ebenfalls einen kritischen Parameter dar (Zeile 16, Tabelle 4-23).

Anhaftungen

Der Leichtgutaustrag weist auch nach der nassmechanischen Aufbereitung deutliche Verschmutzungen an der Partikeloberfläche auf, welche die Qualität des Leichtgutaustrages hinsichtlich der thermischen Verwertung beeinflussen können (Zhou et al., 2014; Chiemchaisri et al., 2010). Um den Einfluss der Anhaftungen auf die Produktqualität des Leichtgutaustrages bewerten zu können, wurde eine Teilmenge des Leichtgutaustrages aus der Versuchsdurchführung vom 27.05.2014 im Labor händisch gewaschen. Das Material wurde mit Leitungswasser gespült, bis keine sichtbaren Oberflächenverschmutzungen mehr zu erkennen waren.

Der Massenanteil der eluierbaren Anhaftungen des Leichtgutaustrages 10 - 60 mm beträgt 6,8 %. Ermittelt wurde der Massenanteil entsprechend der im Kapitel 3.4.4 beschriebenen Vorgehensweise aus 23 Einzelproben. Gegenüber dem Schwergutaustrag mit 16,7 % eluierbaren Anhaftungen weist der Leichtgutaustrag jedoch einen deutlich geringeren Anteil auf.

Vergleichbare Ergebnisse zu den Anhaftungen konnten im Rahmen des BMBF-Forschungsvorhaben TÖNSLM auch für Kunststoffe aus der Grobfraction > 60 mm gewonnen werden. Hierbei wurde ein Verschmutzungsgrad auf den Oberflächen von Folien von 7,5 % ermittelt, für dreidimensionale Kunststoffe bis zu 25 % (Krüger et al., 2016).

Gegenüber dem Glühverlust der Anhaftungen des Schwergutaustrages mit im Mittel 8,5 % weisen die Anhaftungen des Leichtgutaustrages mit einem mittleren Glühverlust von ca. 34 % (Anlage 8-29) eine deutlich höhere Belastung mit organischen Stoffen auf.

Die TOC- Gehalte der Anhaftungen des Leichtgutaustrages liegen in einem Wertebereich von 6,5 bis 7,8 % (Anlage 8-29) und damit deutlich oberhalb der TOC-Gehalte der Anhaftungen des Schwergutaustrages, welche TOC-Gehalte von 2 bis 2,5 % aufweisen.

Im Vergleich zu den Anhaftungen des Schwergutaustrag weisen die Anhaftungen des Leichtgutaustrages für alle untersuchten Elemente deutlich höhere Konzentrationen an Schwermetallen auf (Tabelle 4-25). Wie bereits im Kapitel 4.1.6 diskutiert liegen die Ursache dafür in den Oberflächenkräften, welche bei organischen Material stärker ausgeprägt sind.

Tabelle 4-25: Schwermetallgehalte der Anhaftungen des Leichtgutaustrages

	Cadmium	Mangan	Nickel	Eisen	Kupfer	Blei	Zink
	mg/kg TS						
Anhaftungen Leichtgutaustrag	3,3	500	3,3	32666	833	233	1500
Anhaftungen Schwergutaustrag	u. BG	111	u. BG	13889	111	111	611

u.BG = Messwerte liegen unterhalb der Bestimmungsgrenze von 3,3 mg/kg

Tabelle 4-26 stellt die Analyseergebnisse aus den Untersuchungen des Leichtgutaustrages und einer zusätzlich im Labor gewaschenen Leichtgutprobe, welche keine signifikanten Anhaftungen gegenüber dem Ausgangszustand aufwies, gegenüber.

Der Aschegehalt der gewaschenen Leichtgutprobe liegt deutlich unterhalb den gemessenen Aschegehalten des Vergleichsmateriales (Zeile 2). Diese Entwicklung erscheint plausibel, da die Anhaftungen bei einem mittleren Glühverlust von 34 % vorwiegend mineralischen Ursprunges sind. Das Entfernen der Anhaftungen bewirkt damit eine Erhöhung des absoluten Energiegehaltes (Zeile 5, Tabelle 4-26).

Eine Einflussnahme auf die Schwermetallgehalte des Leichtgutaustrages durch das Entfernen der Anhaftungen ist anhand der vorliegenden Analyseergebnisse nicht eindeutig erkennbar.

Bei den Betrachtungen kommt erschwerend hinzu, dass infolge der Inhomogenität des Materials sehr hohe Schwankungen in den einzelnen Proben bezüglich der einzelnen Inhaltsstoffe vorliegen.

Tabelle 4-26: Produktqualitäten des Leichtgutaustrages (ungewaschen/ gewaschen)

Zeile	Parameter	Einheit	Leichtgut 10 - 60 mm			Leichtgut (10-60 mm) gewaschen
			Probe I	Probe II	Probe III	
1	Wasser ges.	% OS	22,4	24,7	31,5	39,9
2	Aschegehalt (550 °C)		18,5	17,5	17,7	9,0
3	Schwefel ges.		2,5	1,9	1,5	1,47
4	Chlor gesamt		3,7	0,75	1,0	1,3
5	Heizwert (Hu)	MJ/kg TS	22,57	26,2	23,9	27,01
6	Heizwert (Hu)	MJ/kg OS	16,97	19,16	15,61	15,26
7	Antimon	mg/kg TS	36	380	98	177
8	Arsen		5,4	4,6	4,5	1,9
9	Blei		1020	226	458	206
10	Cadmium		32	24	5,4	38
11	Chrom		118	88	85	33
12	Kobalt		6	5	6	4
13	Kupfer		4110	4420	2030	3880
14	Mangan		164	111	151	112
15	Nickel		33	37	57	34
16	Quecksilber		1,1	0,78	0,57	0,26
17	Thallium		< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
18	Vanadium		17	16	11	10
19	Zinn		50	196	41	27

Fazit

Der Leichtgutaustrag 10 - 60 mm weist mit einem Massenanteil von etwa 10 % der Fraktion < 10 mm einen hohen Anteil an Fremdstoffen auf. Bestimmt wird dieser Massenanteil durch die Siebgüte der im Rahmen der Vorkonditionierung durchgeführten Vorabsiebung der Fraktion < 10 mm, wobei der Grad der Siebgüte von der eingesetzten Verfahrenstechnik und dem Materialdurchsatz abhängig ist (Brammer et al., 1997; Krüger et al., 2016; DWA, 2012; Friedmann und Zollner, 1995; Gäth und Nispel, 2012; Pretz und Garth, 2012).

Der Fremdstoffanteil im Leichtgutaustrag in Form von Gestein, Keramik, Glas und Sortierresten beträgt für die Gesamtfraktion 23 %, wobei der Fremdstoffgehalt mit zunehmender Partikelgröße sinkt. Der Fremdstoffgehalt kann durch eine Optimierung der Vorkonditionierung und des Setzprozesses weiter gesenkt werden.

Die energetische Verwertung des Stoffstromes erfordert eine möglichst geringe Restfeuchte des Leichtgutaustrages. Die Entwässerungstechnik ist dahingehend anzupassen und zu optimieren.

Der Leichtgutaustrag ist für eine energetische Verwertung in EBS-Kraftwerken weitestgehend geeignet. Lediglich die Chlor- und Schwefelgehalte überschreiten teilweise die Brennstoffanforderungen. Der Einsatz des Leichtgutaustrages als gütegesicherter Sekundärbrennstoff, beispielsweise in Zementwerken, kann aufgrund hoher Chlor-, Schwefel- und Schwermetallgehalte ausgeschlossen werden (siehe auch Kaartinen et al., 2013, DWA, 2012).

Der Massenanteil der abwaschbaren Anhaftungen des Leichtgutaustrages beträgt etwa 6,8 %. Die Anhaftungen setzen sich vorwiegend aus mineralischen Komponenten zusammen. Durch das Entfernen der Anhaftungen kann der Aschegehalt des Leichtgutaustrages gesenkt werden. Im Rahmen der nassmechanischen Aufbereitung werden im großtechnischen Maßstab üblicherweise Schwertwäscher oder Läutertrommeln zur Vorkonditionierung des Aufgabegutes eingesetzt, woraus zumindest partiell eine Reduktion der Anhaftungen resultiert und die Produktqualität des Leichtgutaustrages gesteigert werden kann.

4.5.4 Bodenfraktion < 10 mm

Die Fraktion < 10 mm fällt im Rahmen der Vorkonditionierung des Aufgabegutes vor der nass-mechanischen Aufbereitung an und stellt einen getrennt zu betrachtenden Stoffstrom dar. Die Fraktion < 10 mm wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit, aufgrund ihrer bodenähnlichen Erscheinung als Bodenfraktion bezeichnet (Abbildung 4-54).



Abbildung 4-54: Bodenfraktion < 10 mm

Die Bodenfraktion weist insgesamt mit einem Medianwert von 21 % einen niedrigen Wassergehalt auf, wobei der Wertebereich von 9 bis 34 % relativ hoch ist (Anlage 8-28). Bei den Glühverlusten ist der Wertebereich mit 18 – 22 % deutlich geringer, der Medianwert beträgt 21 % (Anlage 8-22).

Sieb- und Sortieranalysen

Die Abbildung 4-55 und die Abbildung 4-56 zeigen die Sieblinie der Bodenfraktion sowie die relative Häufigkeit der Siebschnitte. Die Bodenfraktion setzt sich überwiegend aus Komponenten mit der Partikelgröße zwischen 2 und 5 mm zusammen.

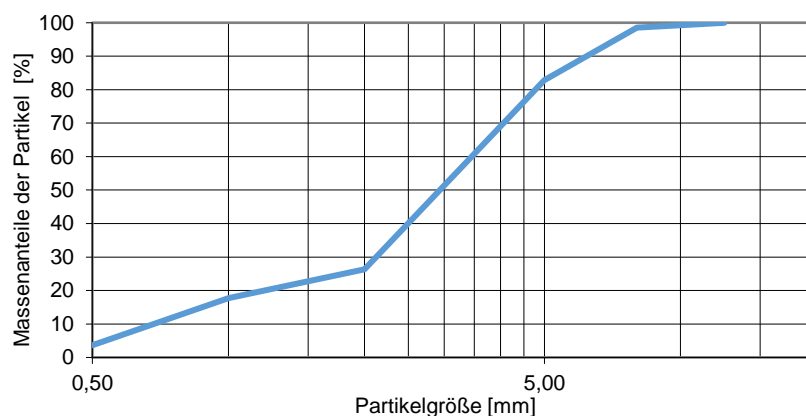


Abbildung 4-55: Sieblinie der Bodenfraktion

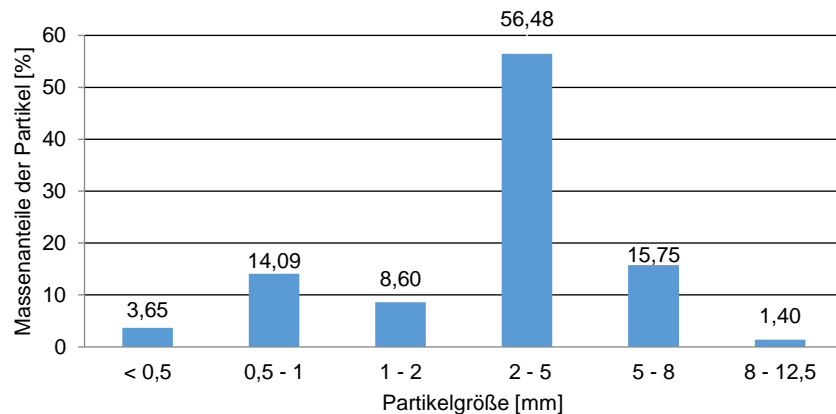


Abbildung 4-56: Relative Häufigkeit der Massenanteile der Bodenfraktion

Auf die Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung der Bodenfraktion mittels Sortieranalyse wurde aufgrund der Feinkörnigkeit dieses Stoffstromes verzichtet. Eine Bewertung der stofflichen Zusammensetzung erfolgt anhand der Glühverluste in Abhängigkeit der Siebschnitte. Die Abbildung 4-57 zeigt, dass die Bodenfraktion unabhängig vom Siebschnitt weitestgehend inertisiert vorliegt, wobei der Gehalt organischer Substanz vor allem in den beiden größeren Teilfraktion 5 – 8 mm und 8 -12,5 mm abnimmt.

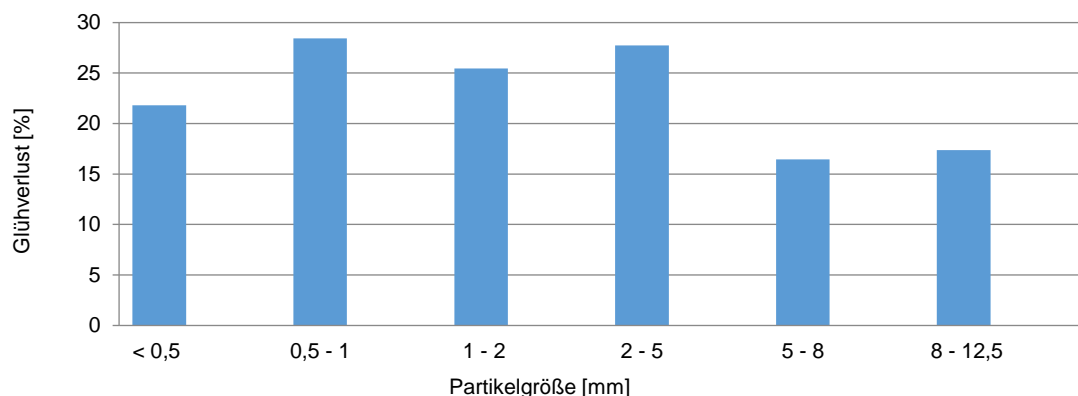


Abbildung 4-57: Glühverluste der Bodenfraktion, differenziert nach Siebschnitten

Anforderungen und Eignung Verwertung/ Beseitigung

In Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung können sich für die Bodenfraktion unterschiedliche Behandlungsoptionen ergeben, welche nachfolgend kurz erläutert werden. Hierzu zählt die weitere Aufbereitung der Bodenfraktion mit dem Ziel der Wertstoffgewinnung, die Wiederablagerung oder stoffliche Verwertung und die thermische Beseitigung.

Aufbereitung zur Wertstoffgewinnung

Die nassmechanische Aufbereitung der Bodenfraktion < 10 mm erfolgte im Rahmen des BMBF- Forschungsvorhaben TÖNSLM durch das Institut für „Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik“ der Technischen Universität Clausthal. Die Aufbereitung erfolgte mittels

Nasstrenntisch oder Wendelscheider, wobei ein Schwergut- und Leichtgutstrom zur Verwertung und ein Reststoff zu Beseitigung erzeugt werden konnte. Die Ergebnisse der Versuchsdurchführungen sind in dem „Leitfaden zum Enhanced Landfill Mining“ (Krüger et al., 2016) dargestellt.

Wiederablagerung

Die Um- oder Wiederablagerung von Reststoffen erfolgt in Abhängigkeit des Schadstoffgehaltes auf Inert- Siedlungsabfall oder Sonderabfalldeponien. Für die Wiederablagerung der Reststoffe sind dabei die Anforderungen gemäß Kapitel 2.4.8 zu beachten. Die Tabelle 4-27 zeigt dazu die nach Deponieverordnung (DepV, 2016) bestimmten Ablagerungsparameter der Bodenfraktion < 10 mm.

Tabelle 4-27: Ablagerungskriterien der Bodenfraktion nach DepV (Auszug)

Zeile	Parameter	Einheit	Grenzwerte				Fraktion <10mm
			Reku-Schicht	DK I	DK II	DK III	
1	Trockenmasse	%					76,3
2	Glühverlust	% TS	-	3	5	10	20,8
3	TOC	% TS	-	1	3	6	9,0
4	lipophile Stoffe	% OS	-	0,4	0,8	4	0,38
5	pH-Wert	-	6,5 - 9	5,5 - 13	5,5 - 13	4 - 13	7,6
6	DOC	mg/l	-	50	80	100	19
7	Phenolindex	mg/l	-	0,2	50	100	< 0,010
8	Chlorid	mg/l	10	1500	1500	2500	25
9	Sulfat	mg/l	50	2000	2000	5000	784
10	Cyanid, leicht freisetzbar	mg/l	-	0,1	0,5	1	< 0,005
11	Fluorid	mg/l	-	5	15	50	< 2
12	Gesamtgehalt an gelösten Feststoffen	mg/l	-	3000	6000	10000	1400
13	Arsen	mg/l	0,01	0,2	0,2	2,5	< 0,001
14	Blei	mg/l	0,04	0,2	1	5	0,001
15	Cadmium	mg/l	0,002	0,05	0,1	0,5	0,0004
16	Kupfer	mg/l	0,05	1	5	10	0,057
17	Nickel	mg/l	0,05	0,2	1	4	0,022
18	Quecksilber	mg/l	0,0002	0,005	0,02	0,2	< 0,0002
19	Zink	mg/l	0,1	2	5	20	0,17
20	Barium	mg/l	-	5	10	30	0,109
21	Chrom gesamt	mg/l	0,03	0,3	1	7	0,002
22	Molybdän	mg/l	-	0,3	1	3	0,023
23	Antimon	mg/l	-	0,03	0,07	0,5	0,007
24	Selen	mg/l	-	0,03	0,05	0,7	< 0,001

Mit Ausnahme der Parameter Glühverlust und Gesamtkohlenstoffgehalt (Zeile 2 und 3) werden von der Bodenfraktion die Ablagerungskriterien für die Deponieklasse DK I eingehalten.

Gemäß Anhang 3 der Deponieverordnung (2016) sind im Rahmen der Zuordnung von Abfällen zu den jeweiligen Deponieabschnitten oder Deponieklassen Überschreitungen der Parameter Glühverlust und TOC mit Zustimmung der zuständigen Behörde zulässig, wenn die Atmungsaktivität (AT_4) unterhalb von $5 \text{ mgO}_2/\text{gTS}$ oder die Gasbildungsrate (GB_{21}) von 20 NI/kgTS unterschritten wird. Die Analysen bezüglich der biologischen Aktivität der Bodenfraktion zeigen (Tabelle 4-28), dass sowohl die Gasbildungsraten als auch die Atmungsaktivitäten deutlich unterhalb der in der Deponieverordnung genannten Grenzwerte liegen. Eine Ablagerung der Bodenfraktion auf einer DK1-Deponie sollte daher möglich sein.

Tabelle 4-28: Biologische Aktivität der Bodenfraktion

	Einheit	Probe I	Probe II	Probe III	Probe IV	DepV (2016) Anhang 3, Nummer 2
Gasbildungsrate (GB_{21}) (mesophil)	[NI/kgTS]	0,09	0,04	0,13	-	20
Gasbildungsrate (GB_{21}) (thermophil)		0,05	0,03	0,06	-	-
Atmungsaktivität (AT_4)	[mgO ₂ /gTS]	0,66	0,33	0,33	0,5	5

Stoffliche Verwertung

Eine Möglichkeit der stofflichen Verwertung stellt der Einsatz der Bodenfraktion als Deponieersatzbaustoff dar. Dabei sind als Deponieersatzbaustoff oder als Ausgangsstoff zur Herstellung von Deponieersatzbaustoffen gemäß Deponieverordnung Teil 3, § 14 (DepV, 2016), außer für die Rekultivierungsschicht des Oberflächenabdichtungssystems, ausschließlich mineralische Abfälle zugelassen, weiterhin sind die Zuordnungskriterien nach Deponieverordnung, Anhang 3, Nummer 2 einzuhalten.

Der Einsatz der Bodenfraktion als Rekultivierungsschicht ist aufgrund der Chlor- und Sulfatgehalte auszuschließen (Tabelle 4-27). Zusätzlich müssen bei dem Einsatz von Rekultivierungsschichten die Anforderungen hinsichtlich der Schwermetallgehalte im Feststoff, gemäß Deponieverordnung, Anhang 3 (DepV, 2016) eingehalten werden (Tabelle 4-29). Anhand der Analyseergebnisse wird ersichtlich, dass ein Einsatz der Bodenfraktion als Rekultivierungsschicht aufgrund deutlicher Überschreitungen der zulässigen Schwermetallkonzentrationen ebenfalls auszuschließen ist.

Tabelle 4-29: Schwermetallgehalte der Bodenfraktion

		Cadmium	Nickel	Mangan	Blei	Kupfer	Zink	Eisen
Fraktion < 10 mm	Schwermetall- analyse	6,7	199	999	1333	1999	3665	56651
Reku- schicht	DepV. [2016], Tabelle 2, Sp 9	1,0	100	-	140	80	300	-

Ein Einsatz des Bodenmaterials für Kompost ähnliche Anwendungen, wie es zum Beispiel in der Literatur diskutiert wird (Masi et al., 2014; Prechthai et al., 2008), stellt aus rechtlichen Gründen in Deutschland keine Option dar.

Thermische Beseitigung

Die thermische Beseitigung der Bodenfraktion soll der Vollständigkeit halber kurz betrachtet werden. Die Anforderungen an Stoffströme zur thermischen Beseitigung in Müllverbrennungsanlagen werden dazu in der Tabelle 4-30 mit der Bodenfraktion verglichen.

Tabelle 4-30: Verbrennungstechnische Eigenschaften der Bodenfraktion < 10 mm (Krüger et al., 2016)

Zeile	Parameter	Einheit	Bodenfraktion < 10 mm	MVA
				Rostfeuerung
1	Korngröße	mm	< 10 mm	< 1000x1000x100 < 2500x2500x200 ⁸
2	Schüttdichte	kg/m ³	-	keine Vorgaben
3	Gesamtwasser	% OS	5,6	60
4	Aschegehalt bei 550 °C		67,8	30 ⁹
5	Chlor ges.		1,2	4
6	Schwefel ges.		5,28	3
7	Brennwert (Ho)	MJ/kg OS	5,3	-
8	Heizwert (Hu) ⁷		4,77	8 - 17
9	Antimon	mg/kg TS	13	2500
10	Arsen		7,8	1000
11	Blei		1150	5000 ¹⁰
12	Cadmium		4,4	100
13	Chrom		495	4000
14	Kobalt		9	-
15	Kupfer		1480	15000
16	Mangan		409	-
17	Nickel		235	2500
18	Quecksilber		0,84	50
19	Thallium		< 0,2	1000
20	Vanadium		26	100
21	Zinn		1860	1000

⁹ Aschegehalt < 30 % möglich, unterliegen jedoch Sonderprüfung

¹⁰ Bei Überschreitungen eines Parameters muss die Summe aus Pb, Cu und Zn unterhalb von 45000mg/kg liegen

Die Bodenfraktion weist erwartungsgemäß schlechte verbrennungstechnische Eigenschaften auf. Sie ist charakterisiert durch einen sehr hohen Aschegehalt (Zeile 4) und einen niedrigen Energiegehalt (Zeile 8). Bezogen auf die enthaltenen Schadstoffe stellt der Schwefel- und Zinngehalt einen kritischen Parameter dar.

Fazit

Die Bodenfraktion < 10 mm beeinflusst die Qualität der im Rahmen der nassmechanischen Aufbereitung der Feinfraktion < 60 mm mittels Nasssetzmaschine erzeugten Stoffströme maßgeblich, siehe auch Kapitel 4.3.3. Eine Abtrennung der Bodenfraktion im Rahmen der Vorkonditionierung der Feinfraktion wird daher empfohlen. In Abhängigkeit von der Beschaffenheit der Bodenfraktion kann diese einer Verwertung zugeführt oder muss beseitigt werden.

Die Bodenfraktion ist hinsichtlich ihrer Eigenschaften wie zum Beispiel dem Glühverlust, der biologischen Aktivität sowie den Schadstoffgehalten, vergleichbar mit ähnlichen deponiebürtigen Stoffströmen aus der Literatur (Mönkare et al., 2016; Prechthai et al., 2008; Quaghebeur et al., 2013; Masi et al., 2014; Kaartinen et al., 2013; Kaczala et al., 2015)

Hinsichtlich ihrer Schadstoffbelastung entspricht die Bodenfraktion, mit Ausnahme des Glühverlustes und TOC-Gehaltes, einem Material zur Ablagerung auf Deponien der Klasse DK I. Aufgrund der äußerst geringen biologischen Aktivität, gemessen als Gasbildungsrate und Atmungsaktivität, muss die Überschreitung der zulässigen Werte für den Glühverlust und TOC- Gehalt jedoch nicht zu einem Ausschluss der Ablagerung auf einer DK1-Deponie gemäß Deponieverordnung (2016) führen.

Entsprechend § 14 der Deponieverordnung (2016) sind als Deponieersatzbaustoff oder als Ausgangsstoff zur Herstellung von Deponieersatzbaustoffen, außer für die Rekultivierungsschicht des Oberflächenabdichtungssystems, ausschließlich mineralische Abfälle zugelassen. Gemäß § 3 Abs. 6 Satz des KrWG (2016) handelt es sich bei der Bodenfraktion nicht um einen mineralischen Abfall, womit der Einsatz als Deponieersatzbaustoff ausscheidet. Der Einsatz der Bodenfraktion zur Herstellung von Rekultivierungsschicht scheidet aufgrund erhöhter Sulfat- und Chlorgehalte im Eluat sowie erhöhter Schwermetallkonzentrationen im Feststoff ebenfalls aus. Eine Möglichkeit der stofflichen Verwertung der Bodenfraktion stellt gegebenenfalls der Einsatz als Zwischenabdeckung auf Deponien dar. In der Literatur diskutierte Verwertungsmöglichkeiten bodenähnlicher deponiebürtiger Stoffströme in kompostähnlichen Anwendungsfällen (Prechthai et al., 2008; Masi et al., 2014) scheidet aufgrund erhöhter Schadstoffgehalte sowie den gegebenen rechtlichen Rahmenbedingungen gemäß § 2 der Bioabfallverordnung (BioAbfV, 2012) aus.

Hinsichtlich der weiteren Aufbereitung der Bodenfraktion zur Wertstoffgewinnung wurden im Rahmen des BMBF- Forschungsvorhaben TÖNSLM umfangreiche Untersuchungen durch

das Institut für „Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik“ der Technischen Universität Clausthal durchgeführt (Krüger et al., 2016). Hierbei konnten ebenso Schwer- und Leichtgüter erzeugt werden die grundsätzlich für eine Verwertung geeignet erscheinen.

Die Beseitigung der Bodenfraktion kann in Form der Wiederablagerung erfolgen oder durch thermische Beseitigungsverfahren.

Die Voraussetzung für die Ablagerung von Abfällen auf Deponien werden durch die Deponieverordnung (DepV, 2016) § 6 und den Zulässigkeits- und Zuordnungskriterien nach Anhang 3 geregelt. Die Bodenfraktion entspricht, mit Ausnahme der Parameter Glühverlust und TOC den Zuordnungskriterien zur Ablagerung auf Deponien der Deponieklasse DK I. Entsprechend § 6 Abs. 6 Satz 2 Nr. 2 dürfen jedoch Abfälle, die aus dem Rückbau einer Deponie stammen, auch bei der Überschreitung einzelner Zuordnungswerte, insbesondere des Glühverlustes und des TOC Wertes, mit Zustimmung der zuständigen Behörde, abgelagert werden.

Kritische Parameter hinsichtlich der thermischen Beseitigung stellen vor allem der hohe Asche- und Schwefelgehalt sowie der niedrige Energiegehalt der Bodenfraktion dar.

4.6 Prozesswasser

Das Prozesswasser der Versuchsanlage (Abbildung 3-4) wird im Kreislauf geführt, was zu einer Anreicherung von Feststoffen und zu einer Aufkonzentration wasserlöslicher Komponenten im Prozesswasser führt. Entsprechend der Versuchsanordnung erfolgte eine einfache Prozesswasseraufbereitung mittels Hydrozyklon, wodurch die Feststoffkomponenten aufgrund von Dichteunterschieden aus dem Prozesswasser abgeschieden werden.

Die untersuchten Wasserproben stammen aus der Aufbereitung des Aufgabegutes < 60 mm und 10 - 60 mm mit Frischwassereinsatz bzw. wurden nachträglich im Labor hergestellt. Spezifische Aussagen zur Prozesswasserqualität unter Berücksichtigung des Durchsatzes und der Wasserwechselraten des im Kreislauf geführten Prozesswassers können aufgrund des Versuchsaufbaues nicht getroffen werden (siehe auch Kapitel 3.2.2). Da die Aufbereitung des Aufgabegutes < 25 mm aufgrund des hohen Anteiles an Bodenmaterial keine Option darstellt (siehe Kapitel 4.3), wurde auf die Charakterisierung des Prozesswassers aus der Aufbereitung des Aufgabegutes < 25 mm verzichtet.

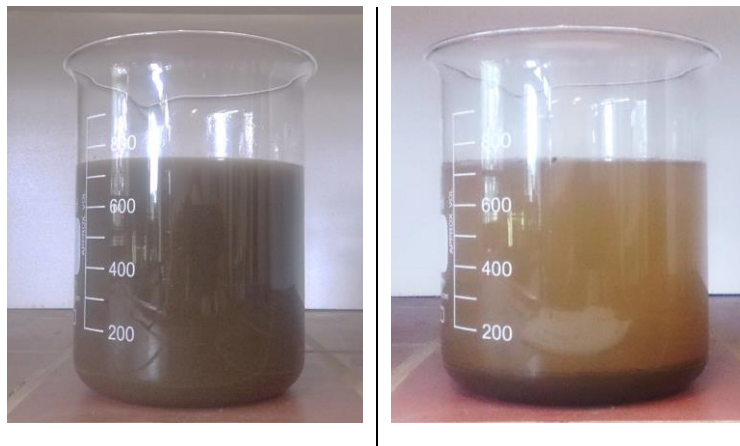


Abbildung 4-58: Prozesswasser aus der Aufbereitung des Aufgabegutes 10 - 60 mm (links: Prozesswasser; rechts: Prozesswasser nach 17 h Standzeit)

Grundlegende Prozesswasserparameter

Die Eigenschaften des Prozesswassers richten sich nach dem Aufgabegut, insbesondere nach der Masse und der Qualität der abschlammmbaren Bestandteile. Insgesamt weist das Prozesswasser eine starke Trübung auf (Abbildung 4-58) und ist geruchlos.

Das Prozesswasser aus der Aufbereitung des Aufgabegutes < 60 mm weist einen Feststoffgehalt von etwa 8 % auf (Anlage 8-33). Einen deutlich geringeren Anteil an Feststoffen, im Mittel etwa 1,5 %, enthält hingegen das Prozesswasser aus der Aufbereitung des Aufgabegutes 10 - 60 mm.

Die Trockensubstanz des Prozesswassers aus der Aufbereitung des Aufgabegutes 10 - 60 mm enthält mit einem mittleren Glühverlust von 27 % einen geringfügig höheren Anteil

organischer Substanz (Anlage 8-33), der sich aus der Abtrennung der Bodenfraktion < 10 mm ergibt. Die Glühverluste liegen für beide Prozesswässer in einem engen Wertebereich, was auf eine homogene stoffliche Zusammensetzung der Trockensubstanz weist.

Bei den Prozesswasserfeststoffen handelt es sich um eluierbare Anhaftungen des Aufgabegutes, weshalb der Feststoff aus dem Prozesswasser zur Aufbereitung des Aufgabegutes 10 - 60 mm in seiner Charakteristik den eluierbaren Anhaftungen des Aufgabegutes (siehe Kapitel 4.1.6) entsprechen muss. Allgemeine wasseranalytische Parameter für die unterschiedlichen Prozesswässer sind in der Anlage 8-34 gegenüber gestellt.

Das Prozesswasser aus der Aufbereitung des Aufgabegutes < 60 mm besitzt einen schwach sauren Charakter, wogegen das Prozesswassers aus der Aufbereitung des Aufgabegutes 10 - 60 mm im schwach alkalischen Bereich liegt. Insgesamt stellt der pH- Wert keinen kritischen Parameter dar und die pH- Werte unterschieden sich in Abhängigkeit des Aufgabegutes nur geringfügig.

Gegenüber den Redoxpotenzialen von Leitungswasser und destilliertem Wasser weisen beide Prozesswässer schwach negative Potenziale auf. Die Intensität von Redoxreaktionen, welche durch biologische Abbauprozesse hervorgerufen werden, steigt mit dem Anteil der abbaubaren organischen Substanz, wobei reduzierende Eigenschaften auf eine geringe Sauerstoffverfügbarkeit hindeuten. Die Ursache dafür kann aus dem behandeltem Aufgabegut resultieren, da Böden die anaeroben Bedingungen ausgesetzt waren Redoxpotenziale bis -35 mV aufweisen können (Scheffer und Schachtschabel, 1976). Andererseits können im verwendeten Waschwasser selbst sauerstoffzehrende Substanzen vorhanden sein.

Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Summenparameter für die Ionen-Konzentration im Wasser und beschreibt vor allem den Salzgehalt. Gegenüber destillierten Wasser und Leitungswasser weisen beide Prozesswässer eine stark erhöhte elektrische Leitfähigkeit auf, deren Höhe wiederum durch das Aufgabegut bestimmt wird. Das Prozesswasser aus der Aufbereitung des Aufgabegutes < 60 mm weist die höchsten Werte auf, wobei auch hier die Bodenfraktion < 10 mm als Haupteintragspfad für Salze angesehen werden kann.

Das Aufgabegut beeinflusst in Abhängigkeit von seiner Zusammensetzung die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Prozesswassers und hier insbesondere den Feststoffgehalt. Anhand der vorliegenden Analyseergebnisse bewirkt die Bodenfraktion < 10 mm im Aufgabegut hohe Feststoffgehalte und Salzkonzentrationen im Prozesswasser.

Im Hinblick auf die Erzeugung verwertbarer Stoffströme sowie aus verfahrenstechnischer Sicht wird empfohlen, die Bodenfraktion < 10 mm vor der nassmechanischen Aufbereitung von dem Aufgabegut abzutrennen (siehe Kapitel 4.2). Die nachfolgenden Untersuchungen beziehen

sich damit auf Prozesswasser, welches aus der Aufbereitung des Aufgabegutes 10 - 60 mm stammt.

Inhaltsstoffe

Die Abwasserverordnung (AbwV, 2014) definiert allgemeine Anforderungen an Abwässer für die Einleitungsstelle in Gewässer. Anhang 27 der Abwasserverordnung definiert spezielle Anforderungen an Abwasser, dessen Schadstofffracht aus der Behandlung von Abfällen stammt. In Tabelle 4-31 sind die Anforderungen an das Abwasser für die Einleitungsstelle, gemäß AbwV, Anhang 27, den ermittelten Prozesswasserparametern auszugsweise gegenübergestellt, die Parameter Aluminium, Fluorid, Phenolindex, Fischgiftigkeit, Bakterienleichenhemmung und Daphniengiftigkeit wurden im Rahmen der Prozesswasseruntersuchung nicht analysiert.

Tabelle 4-31: Qualität des Prozesswassers entsprechend der AbwV, Anhang 27

Zeile	Parameter	Einheit	Anhang 27 der AbwV (gekürzt und ergänzt*)	Prozesswasser (10 - 60 mm)
			Qualifizierte Probe der 2- Stunden Mischprobe	Wertebereich
1	CSB	mg/l	200	75,3- 246
2	Nges		30	5,07, 5,29
3	Phosphor _{gesamt}		2	0,297 - 5,25 ¹
4	Nitrit		2	< 0,6 ²
5	Eisen		3	0,52 - 1,09
6	Sulfat		-	201 - 381
7	DOC		-	37,6 - 65,1

¹ bestimmt als Ortho-Phosphat

² alle Proben liegen unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,6 mg/l

Für den Parameter chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) kommt es teilweise zu Überschreitungen der zulässigen Grenzwerte, so dass dieser Parameter im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen als kritisch eingestuft werden muss.

Gleiches gilt für den Parameter Phosphor, hier jedoch vereinfachend als Ortho- Phosphat gemessen. Diese Vereinfachung wurde unter der Annahme getroffen, dass der enthaltene Phosphor lediglich anorganisch gebunden und damit überwiegend als Ortho- Phosphat vorliegt (Scheffer und Schachtschabel, 1976).

Die gemessenen Stickstoffverbindungen und Eisengehalte liegen deutlich unterhalb der Grenzwerte, so dass diese als unkritisch eingeschätzt werden.

Ergänzend zu den Anforderungen gemäß AbwV, Anhang 27 wurden für das Prozesswasser die Sulfatgehalte bestimmt sowie der Anteil an gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC). Die

gemessenen Sulfatgehalte liegen in einem Wertebereich zwischen 201 – 381 mg/l. Im Vergleich dazu liegt der zulässige Sulfatgehalte im Trinkwasser gemäß Trinkwasserverordnung, Anlage 3, Teil 1 (TrinkwV, 2016) bei 250 mg/l. Der Sulfatgehalt im Prozesswasser kann insgesamt als unkritischer Parameter angesehen werden.

Die Gehalte der gelösten organischen Kohlenstoffe (DOC) liegen in einem Bereich zwischen 37,6 und 65,1 mg/l. Der zulässige DOC-Gehalt im Eluat für Inertabfälle zur Ablagerung auf Deponien der Deponiekategorie DK I liegt gemäß Deponieverordnung, Anhang 3, Tabelle 2 (DepV, 2016) bei 50 mg/l. Der Gehalt an gelösten organischen Kohlenstoff im Prozesswasser wird damit als gering eingeschätzt.

Feststoffanalyse

Im Rahmen der Prozesswasseranalyse erfolgt zusätzlich eine Charakterisierung des im Prozesswasser enthaltenen Feststoffes. Abbildung 4-59 und Abbildung 4-60 zeigen die zugehörige Sieblinie und Häufigkeitsverteilung.

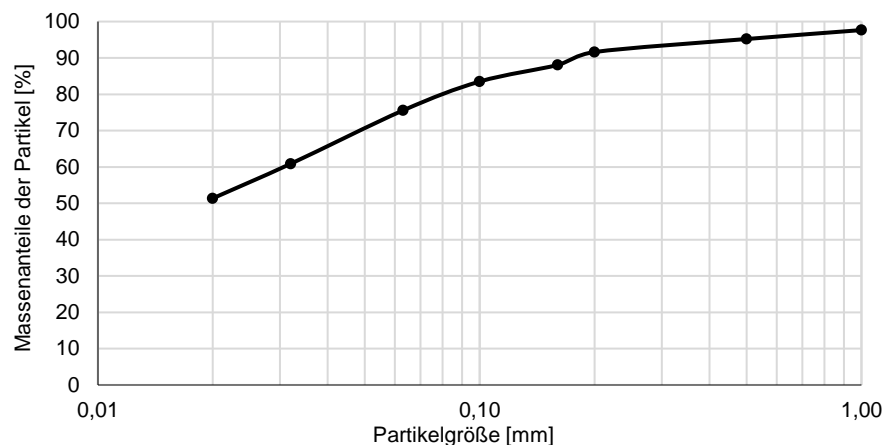


Abbildung 4-59: Sieblinie der Prozesswasserfeststoffe

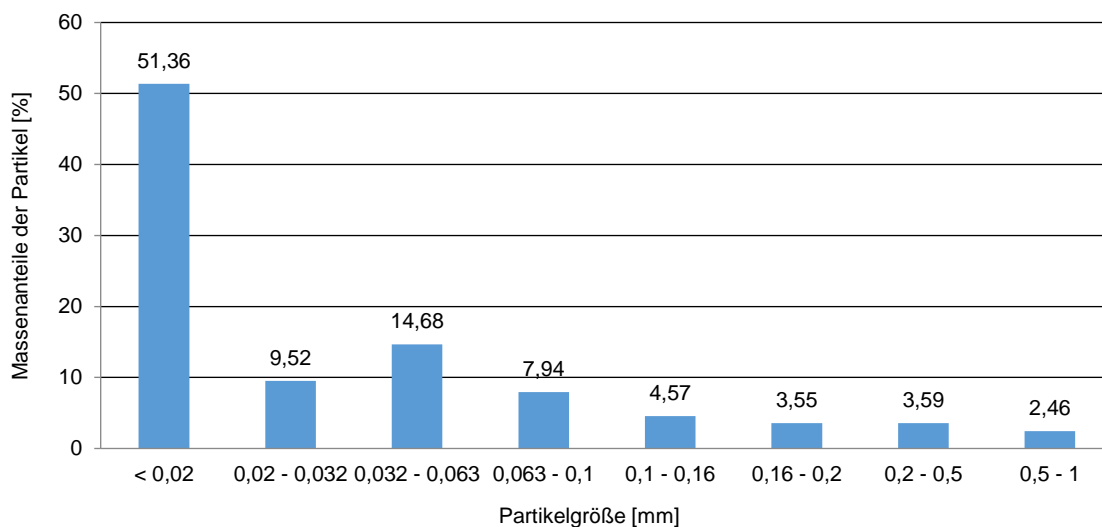


Abbildung 4-60: Relative Häufigkeit der Prozesswasserfeststoffe

Anhand der Siebanalyse wird ersichtlich, dass der Feststoff im Prozesswasser überwiegend aus schluffigen und tonigen Komponenten < 0,02 mm besteht. Der Feststoff weist im Mittel, einen Glühverlust von etwa 27 % auf (Anlage 8-33), wobei der Anteil organischer Substanz mit zunehmender Partikelgröße deutlich ansteigt (Abbildung 4-61).

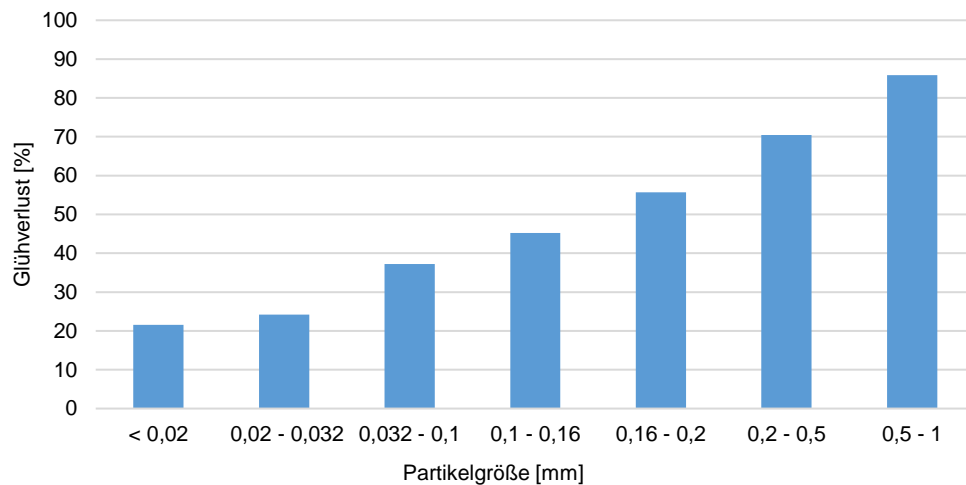


Abbildung 4-61: Glühverluste der Feststoffe im Prozesswasser, differenziert nach Siebschnitten

Im Rahmen der Feststoffanalysen erfolgte weiterhin eine Schwermetallanalyse, die Ergebnisse sind in der Tabelle 4-32 zusammengefasst.

Tabelle 4-32: Schwermetallgehalte der Prozesswasserfeststoffe

Partikelgröße [mm]	Cadmium	Mangan	Nickel	Eisen	Kupfer	Blei	Zink
	mg/kg						
0,5 - 1	4,1	581	74	19922	664	236	1867
0,2 - 0,5	3,4	617	72	23143	617	229	1885
0,16 - 0,2	6,6	1000	80	31666	1000	280	2250
0,1 - 0,16	6,6	1166	85	38333	1166	313	2833
0,063 - 0,1	6,6	1500	86	41666	1083	313	3000
0,032 - 0,063	3,3	1000	76	40000	916	273	2833
0,02 - 0,032	3,3	833	76	40000	916	270	2666
< 0,02	3,3	666	90	51666	1083	360	3000

Die Feststoffe im Prozesswasser entsprechen den eluierbaren Anhaftungen im Aufgabegut, so dass auch die Schwermetallgehalte im Prozesswasserfeststoff mit den Schwermetallgehalten der eluierbaren Anhaftungen im Aufgabegut vergleichbar sind (Tabelle 4-8). Für die Elemente Nickel, Eisen, Kupfer, Blei und Zink nehmen die Konzentrationen tendenziell mit der Abnahme der Partikelgröße zu, so dass die in Bezug auf die Masse dominierende Fraktion < 0,02 mm die höchsten Schwermetallbelastungen aufweist. Bei den Elementen Cadmium und Mangan kommt es hingegen zu einer Anreicherung im mittleren Partikelgrößenbereich der betrachteten Siebschnitte.

Fazit

Die Anwesenheit der bodenähnlichen Fraktion < 10 mm im Aufgabegut führt im Rahmen der nassmechanischen Aufbereitung zu hohen Feststoffgehalten und Salzkonzentrationen innerhalb des Prozesswassers. Sowohl aus verfahrenstechnischer Sicht als auch im Hinblick auf die Erzeugung verwertbarer Stoffströme, siehe Kapitel 4.1, wird damit die die Abtrennung der bodenähnlichen Fraktion < 10 mm aus dem Aufgabegut < 60 mm empfohlen.

Das Prozesswasser aus der Aufbereitung des Aufgabegutes 10 - 60 mm weist insgesamt niedrige Schadstoffkonzentrationen auf und hält für die analysierten Parameter die Anforderungen an Abwässer aus der Aufbereitung von Abfällen für die Einleitungsstelle gemäß Abwasserverordnung, Anhang 27 (AbwV, 2014) weitestgehend ein. Lediglich für die Parameter CSB und Ortho-Phosphat, kommt es zumindest teilweise zu Überschreitungen hinsichtlich der definierten Grenzwerte.

Der Feststoffgehalt des Prozesswassers aus der Aufbereitung des Aufgabegutes 10 - 60 mm ist insgesamt gering. Anhand der Siebanalyse wird ersichtlich, dass der Feststoff im Prozesswasser überwiegend aus sehr feinen Partikeln mit Abmessungen < 0,02 mm besteht. Im Rahmen der Versuchsdurchführungen erfolgte eine Prozesswasseraufbereitung mittels Hydrozyklon (siehe Kapitel 3.2.1). Diese sind geeignet für das Klassieren und Abscheiden körniger Stoffe und arbeiten je nach Bauart in einem Trenngrößenbereich zwischen 5 µm bis 250 µm (Schubert, 2008; Luckert, 2004; Patzold et al., 2008). Die genaue Spezifikation des im Rahmen der Versuchsdurchführung verwendeten Hydrozyklons ist unbekannt, so dass keine Bewertung hinsichtlich des Feststoff-Abscheidegrades möglich ist. Aufgrund der Arbeitsbereiche der Hydrozyklone würde eine permanente Kreislaufführung des Prozesswassers zu einer Anreicherung der feinstkörnigen Partikel im Prozesswasser führen. Eine weitere Aufbereitung des Prozesswassers mit dem Ziel einer weitestgehenden Abtrennung feinstkörniger Partikel kann durch den Einsatz durch Zentrifugen, welche im Trennkorngrößenbereich zwischen 1 µm bis 10 µm arbeiten, erfolgen (Schubert, 2008). Eine Aufbereitung unter Verwendung einer Zentrifuge und ausführliche Analyse des Prozesswassers aus der nassmechanischen Aufbereitung des Deponates erfolgte im Rahmen des BMBF- Forschungsvorhaben TÖNSLM schließlich durch das Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Braunschweig. Weiterführende Ergebnisse dazu sind in dem Leitfaden zum Enhanced Landfill Mining (Krüger et al., 2016) dargestellt.

Neben der Anreicherung von feinstkörnigen Partikeln infolge der Kreislaufführung kann es weiterhin zu einer Aufsalzung oder Anreicherung wasserlöslicher Stoffe im Prozesswasser kommen. Um dies zu verhindern wird in der Praxis ein Teilstrom des Prozesswasserkreislaufes, in der Regel bis zu 10 Vol.-%, ausgeschleust und durch Frischwasser ersetzt (Heimhard, 1995; LFU, 1993).

5 Ökonomische und ökologische Bewertung

5.1 Definition des Betrachtungsraumes

Zur ökonomischen als auch ökologischen Bewertung der nassmechanischen Aufbereitung von Feinmaterial aus Deponat bedarf es der Entwicklung eines vollständigen Aufbereitungskonzeptes. Im Rahmen der Arbeit wurde dazu auf Basis der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen ein Verfahrenskonzept zur nassmechanischen Aufbereitung von Deponat mit einem Durchsatz von 50 Mg/h entwickelt. Die ökonomische und ökologische Bewertung der nassmechanischen Aufbereitung erfolgt innerhalb eines definierten Untersuchungsrahmens (Abbildung 5-1). Der Rückbau sowie die Vorkonditionierung des Deponates sind nicht Bestandteil der Betrachtungen.

Wesentliche Erkenntnisse aus den Versuchsdurchführungen im halbtechnischen Maßstab, wie beispielsweise die Massenanteile der einzelnen Austragsgüter und Reststoffe sowie die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich des Wasser- und Energieverbrauches und Produktqualitäten wurden bei der Erstellung des Konzeptes berücksichtigt. Die Massenanteile der Stoffströme basieren auf den Ergebnissen der Versuchsdurchführung zur Aufbereitung des Aufgabegutes 10 - 60 mm vom 27.05.2014 gemäß Anlage 8-16 sowie der stofflichen Zusammensetzung des Schwergutaustrages. Der Einfluss des Wassergehaltes wird aus Gründen der Vereinfachung vernachlässigt. Die Aufteilung der Massenströme infolge der Sandwäsche ergeben sich aus der Annahme, dass die Partikel $< 0,1$ mm (40% der Gesamtmasse des Feingutes) mittels Sandwäscher abgeschieden werden und als Reststoff einer Beseitigung zugeführt werden müssen. Die Massenanteile wurden anhand der Sieblinie des Feingutaustrages gemäß Abbildung 4-37 ermittelt.

Das Konzept beinhaltet zusätzliche Aggregate bzw. Prozessschritte vornehmlich zur Steigerung der Produktqualität der erzeugten Stoffströme, die in der halbtechnischen Versuchsanordnung nicht enthalten waren. Hierzu zählt der Einsatz eines Schwertwäschers, der der Nasssetzmaschine mit dem Ziel der Verbesserung des Materialaufschlusses und der Reduktion abschlämmbarer Bestandteile vorgeschaltet ist (siehe Kapitel 3.2.2). Weiterhin wurde das Konzept um einen Sandwäscher zur Aufbereitung des Feingutaustrages (siehe Kapitel 4.5.2) sowie um Aggregate zur Abscheidung von Metallen und Glas aus dem Schwergutaustrag erweitert. Die Abscheidung von Glas erfolgt dabei mittels NIR-Sortiertechnik (siehe Kapitel 4.5.1). Der Einsatz von Windsichtern oder NIR-Sortieren zum Entfernen von Fremdstoffen wie Kunststoffen, Holz, Textilien oder bspw. Porenbeton oder Gips aus dem Schwergutstrom ist bei Bedarf ebenfalls möglich. Bei den verwendeten Aufbereitungsaggregaten handelt es sich um konventionelle, am Markt erhältliche Technik. Die Auswahl erfolgte anhand der Kriterien Materialdurchsatz und verarbeitbares Partikelgrößenspektrum (Tabelle 5-1 und Tabelle 5-2).

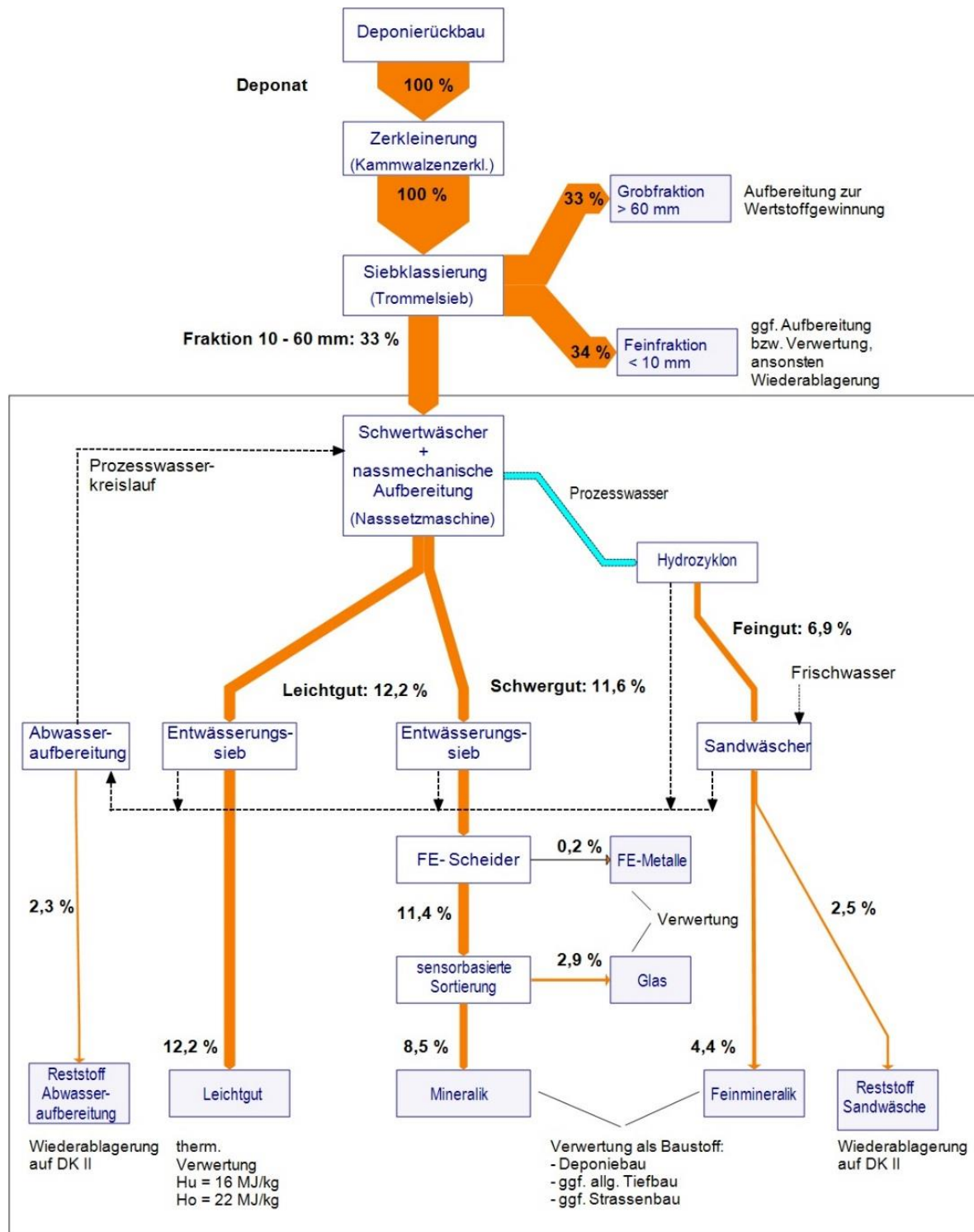


Abbildung 5-1: Verfahrenskonzept und Untersuchungsrahmen

Randbedingungen

Die Annahmen und Randbedingungen unter denen die ökonomische als auch ökologische Bewertung des Verfahrens durchgeführt wurde sind nachfolgend aufgelistet:

- Die Vorkonditionierung des Deponates ist nicht Bestandteil der ökonomischen oder ökologischen Betrachtung. Im Zuge von Deponierückbaumaßnahmen ist eine Vorkonditionierung des Deponates mit mobiler Technik beziehungsweise MBA-Technologie möglich.
- Der Durchsatz der Aufbereitungsanlage beträgt 50 Mg/h Inputmaterial. Unter der Annahme, dass die Aufbereitungsanlage im Zweischichtbetrieb mit 8 h/d an 250 d/a und bei einer Verfügbarkeit von 70 % betrieben wird, würde die Aufbereitung der gesamten Abfälle der Fraktion 10 - 60 mm, die im Zeitraum zwischen 1989 bis 2004 ohne Vorbehandlung auf der Beispieldeponie abgelagert wurden, innerhalb von 6 Jahren erfolgen. Die Anlage wäre theoretisch nach Beendigung der Rückbaumaßnahme innerhalb dieses Zeitraumes abzuschreiben. Dieser Zeitraum deckt sich mit üblichen Abschreibungszeiten für mobile verfahrenstechnische Anlagen in der Abfallwirtschaft.
- Die Gesamtanlage zur nassmechanischen Aufbereitung ist semi-mobil ausgeführt, gemäß Abschreibungstabelle der Abfallentsorgungs- und Recyclingwirtschaft wurde für die Aufbereitungsanlage eine Abschreibungsdauer von 6 Jahren gewählt (AFA, 1995).
- Die nassmechanische Aufbereitung des Materiales erfolgt auf dem Deponiegelände, es wird angenommen, dass entsprechende Stellflächen vorhanden sind und die Zahlung von Grundstücksrente oder Hallen zur Gewährleistung der Frostsicherheit der Aufbereitungsanlage entfällt.
- Zur Vorkonditionierung des Aufgabegutes 10 - 60 mm vor der nassmechanischen Aufbereitung wird ein Schwertwäscher eingesetzt. Die Beschickung des Schwertwäschers erfolgt mittels Förderband über einen Aufgabetrichter, wobei die Materialaufgabe durch Radlader realisiert wird.
- Zwischenlager für die erzeugten Austragsströme stehen auf dem Deponiegelände in ausreichendem Umfang zur Verfügung.
- Der Transport der Austragsgüter von der Aufbereitungsanlage in die angrenzenden Zwischenlager erfolgt mittels Rollcontainer und LKW. Die Beschickung der Rollcontainer erfolgt durch Förderbänder.
- Die nassmechanische Aufbereitung erfolgt durch den Deponiebetreiber, die notwendige Infrastruktur und die Geräte für den Transport des Aufgabegutes beziehungsweise der Austragsgüter sind vorhanden und im Besitz des Betreibers.
- Das Prozesswasser für die nassmechanische Aufbereitung wird im Kreislauf geführt, das Gesamtvolumen an Prozesswasser wurde mit 100 m³ veranschlagt. In den Kreislauf integriert ist eine Abwasseraufbereitungsanlage zur Abscheidung von Feststoffen.

- Um eine Aufkonzentration von gelösten Stoffen im Prozesswasser zu minimieren werden pro Stunde 5 Vol.-% des gesamten Prozesswasserkreislaufes, dies entspricht 5 m³/h, durch Frischwasser ersetzt, bzw. als Prozesswasser abgeführt und der Abwasseraufbereitung zugeführt (siehe Kapitel 4.6). Der Austrag von Prozesswasser über die Austragsgüter wird vernachlässigt.
- Es wird angenommen, dass das gesamte Prozesswasservolumen im Rahmen von Wartungsarbeiten, vier Mal pro Jahr vollständig ausgetauscht wird.
- Das Konzept berücksichtigt die Aufbereitung der Feinfraktion zur Gewinnung von Deponievolumen zur Verlängerung der Nutzungsdauer der Deponie. Eine Wiederablagerung entstehender Reststoffe aus der Aufbereitung erfolgt auf der gleichen Deponie, wobei keine Ablagerungskosten anfallen.
- Die notwendigen Aggregate zur Konfektionierung der Austragsgüter nach der nassmechanischen Aufbereitung ergeben sich in Abhängigkeit der stofflichen Zusammensetzung des Aufgabegutes und der Zielstellung der Aufbereitung. Die Erweiterung des Aufbereitungsverfahrens, zum Beispiel durch NE-Scheider, ist bei Bedarf möglich.
- Der Betrieb der nassmechanischen Aufbereitungsanlage erfolgt mittels elektrischer Energie.

Spezielle Randbedingungen für die ökologische Betrachtung

- Die Herstellung der einzelnen Aggregate sowie deren Entsorgung/ Verwertung nach der Nutzungsdauer werden als Lasten abgeschätzt (Anlage 8-37). Gutschriften aus dem Recycling von Metallen oder der thermischen Verwertung der Anlagenkomponenten werden nicht berücksichtigt.
- Die Peripherie der Aufbereitungsanlage wie beispielsweise Rohrleitungen, Pumpen, Förderbänder sowie der Prozesswassertank wird in der nachfolgenden Betrachtung nicht berücksichtigt.
- Die Anlieferung und Errichtung der Aufbereitungsanlage sowie der Materialtransport innerhalb der Anlage mittels Radlader oder Förderband wird nicht berücksichtigt.
- Innerhalb der Betriebsphase resultieren Umweltbelastungen lediglich aus dem Verbrauch von elektrischer Energie und Wasser.
- Der Einsatz von Hilfs- und Betriebsstoffen wie beispielsweise Schmierfett oder Öl wird nicht bilanziert.
- Die energetische Verwertung des Leichtgutes erfolgt in einem EBS-Kraftwerk wobei 20 % des Energiegehaltes in Strom und 45 % in Wärme umgewandelt werden. Der produzierte Strom wird gegenüber dem deutschen Strommix als Gutschrift bilanziert, die produzierte Wärme wird als Prozesswärme industriell genutzt und stellt ebenfalls eine Gutschrift dar.

- Die stoffliche Verwertung von Kies und Sand substituiert den Abbau von Primärrohstoffen und stellt eine Gutschrift dar.
- Das aus dem Deponat abgetrennte Glas wird dem Stoffkreislauf zur Verfügung gestellt, wodurch die Sammlung- und der Transport von Glas entfällt bzw. als Gutschrift bilanziert wurde. Der Aufbereitungsprozess bzw. die tatsächliche Verwendung des Glases ist nicht Bestandteil der nachfolgenden Betrachtung.
- Die Verwertung der Metalle wird aufgrund der geringen Mengen nicht berücksichtigt,
- Die Entsorgung von Reststoffen erfolgt auf Hausmülldeponien und wird als Last berücksichtigt

Die im Technikumsmaßstab verwendete Setzmaschine vom Typ Triple A der AGS Anlagen + Verfahren GmbH leistet bei einer Siebfläche von 400 x 1000 mm einen maximalen Durchsatz von 25 Mg/h. Im Rahmen der Konzeptentwicklung ist damit ein Upscaling der Nasssetzmaschine erforderlich gewesen. Für den entsprechend höheren Durchsatz ist daher die Nasssetzmaschine Triple A mit einer Siebfläche von 800 x 1500 mm berücksichtigt worden. Wesentliche Parameter wie z.B. der Energiebedarf wurden vom Anlagenhersteller bereitgestellt. Auf ein Upscaling der Peripherie der Nasssetzmaschine wie beispielsweise Rohrleitungen, Pumpen und Entwässerungssiebe wurde verzichtet, die Peripherie wird im Rahmen der Investitionskosten pauschal unter dem Punkt Sonstiges berücksichtigt. Zur Abschätzung der Investitionskosten für die zusätzlichen Aggregate (Schwertwäscher, Sandwäscher, Überbandmagnet, Glassortierer) wurden Herstellerangaben verwendet (Tabelle 5-2).

Die Betriebskosten wurden aus den Ergebnissen der Versuchsdurchführungen beziehungsweise in Rücksprache mit den Anlagenherstellern ermittelt. Für die Betriebsmittel Strom und Wasser sowie für die Kosten zur Abwasseraufbereitung wurde auf projektinterne Informationen zurückgegriffen (s. auch Tabelle 5-4).

Tabelle 5-1: Ermittelte stündliche Massenströme für die einzelnen Feststofffraktionen aus der nassmechanischen Aufbereitung bei einem Gesamtdurchsatz von 50 Mg/h, bezogen auf das Aufgabegut gemäß Abbildung 5-1.

Stoffstrom	Massenanteil an der Fraktion (10 - 60 mm)	Massenstrom der Austragsgüter bei einem Gesamtdurchsatz von 50 Mg/h
Schwergutaustrag <ul style="list-style-type: none"> • Mineralik • Fe- Metalle • Glas 	<ul style="list-style-type: none"> • 25,5 % • 0,6 % • 8,7 % 	ca. 12 Mg/h ca. 3 Mg/h ca. 4 Mg/h
Feingutaustrag ¹	• 13,2 %	ca. 7 Mg/h
Leichtgutaustrag	• 36,6 %	ca. 18 Mg/h
Reststoffe aus der Sand- und Prozesswasser-aufbereitung zur erneuten Deponierung	• 14,4 %	ca. 6 Mg/h

¹ Feingutaustrag nach der Sandwäsche

Tabelle 5-2: Spezifikationen der zu Grunde gelegten Verfahrenstechnik inkl. Verbrauchsdaten

Aggregat	(Herstellerangaben) Durchsatz, Partikelgröße	Durchsatz (Soll) ¹	Preis in € ohne MwSt.	Elektrische Anschlussleistung in kW
Schwertwäscher (FFA-Fiebig Modell 60/2050/6000/2)	- bis 60 Mg/h (2 – 80 mm)	50 Mg/h	69.000,00	37
Nasssetzmaschine 800 x 1500 mm Inkl. Peripherie (Pumpen, Hydrozyklon, Förderbänder)	50 Mg/h	50 Mg/h	250.000	50
Fe- Scheider (Steinert Elektromagnet)	-	3 Mg/h	20.000,00	3
Glassortierer (Msort AP 1200)	bis 40 Mg/h (10 – 50 mm)	ca. 4 Mg/h	100.000,00	10
Sandwäscher	bis 3m ³ Feststoff/h ² /entspricht 7,5 Mg/h	ca. 11Mg/h	2 x 80.000,00	2 x 5
Prozesswasseraufbereitung inkl. Peripherie	-	-	450.000	35
Prozesswassertank	100 m ³ Füllvolumen	-	35.000	-
Sonstiges (Förderbänder etc.)	-	-	346000	-
- Summe			1.430.000	140

¹ Bezugnehmend auf die ermittelten Massen siehe Tabelle A 5.1-1 in Verbindung mit Abbildung 5.1-1

² Bei einer Dichte des Feingutes von 2,5 Mg/m³ ergibt sich ein Massendurchsatz von bis zu 7,5 Mg/h

5.2 Ökonomische Bewertungen des Konzeptes

5.2.1 Variable Kosten und Kapitalkosten

Der jährlichen Kosten differenziert nach Kapitalkosten und variablen Kosten und sind in den Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4 aufgelistet. Der Fixkostenanteil fällt mit knapp 37 % vergleichsweise gering aus. Abfallwirtschaftliche Verwertungs- und Behandlungsanlagen weisen in der Regel Fixkostenanteile deutlich oberhalb 50 % auf. Die spezifischen Kosten für die nassmechanische Aufbereitung betragen knapp € 5 pro Tonne Input für die Feingutaufbereitung (Tabelle 5-5).

Stehen dem Deponiebetreiber eigene Anlagen mit freien Kapazitäten zur Aufbereitung oder Behandlung des Deponates zur Verfügung, können diese genutzt werden. Damit können notwendige Investitionen reduziert und bestehende Anlagen ausgelastet werden. Kostenbestimmend ist auch der zeitliche Ablauf der Rückbaumaßnahme, weshalb ein Rückbau in kurzer

Zeit zu bevorzugen ist. Die Rückbaugeschwindigkeit wird dabei von den Kapazitäten der Aufbereitungsanlagen und Zwischenlager bestimmt (Krüger et al., 2016).

Tabelle 5-3: Kapitalkosten der nassmechanischen Aufbereitung der Feinfraktion < 60 mm

Abschreibungsdauer n	6 Jahre
Zinssatz i (Kalkulationszinsfuß)	4 %
Annuitätsfaktor Af i = Zinssatz n = Laufzeit	0,1908
Investitionskosten	1.430.000 €
Annuität	272.790 €/a

Tabelle 5-4: Variable Kosten der nassmechanischen Aufbereitung der Feinfraktion < 60 mm

Personalkosten ¹			
Betriebsstunden	2800 ²		h/a
		jährliche Kosten	
2 x Maschinenführer (TVöD- E, E 10, Stufe 3)	85.252	189.183	€/a
3 x Arbeiter (TVöD- E, E 7, Stufe 3)	98.364		
1 x Ingenieur (4h/Woche- TVöD- E, E 13, Stufe 3)	5.567		
Wartung und Reparatur (RWU)			
RWU = 6% der Investitionskosten		85.800	€/a
Betriebsstoffe			
Wasser			
Wasserwechsel (4 mal pro Jahr)	100m ³ x 4 * 2 €/m ³	800	€/a
Ergänzungswasser	5m ³ /h * 2800 h/a * 2 €/m ³	28.000	€/a
Abwasseraufbereitung ³	(5m ³ /h * 2800 h/a + 400)m ³ /a * 3 €/m ³	43.200	€/a
Energieverbrauch			
	140 ⁴ kW/h * 2800h/a * 0,15 ⁵ €/kW	58.800	€/a
Sonstiges			
Diesel für Radlader usw. = 2 % der Investitionskosten		27.000	€/a
Summe		434.383	€/a

¹ Entgelttabellen 2016 bis 2018

² 2 Schicht- System mit 250 d/a und 16h/d bei 70 % Verfügbarkeit

³ Gesamte Abwassermenge aus Wasserwechsel und Ergänzungswasser

⁴ Gesamtenergieverbrauch als Summe der elektrischen Anschlussleistung aller integrierten Aggregate gemäß Tabelle A 5.2-2

⁵ Industriestrompreis inkl. Stromsteuer

Tabelle 5-5: Spezifische Betriebskosten

Durchsatz (140.000Mg/a)	50	Mg/h
Betriebsstunden	2.800	h/a
Dauer der Rückbaumaßnahme	6,0	a
Investitionskosten	1.430.000	€
Annuität	272.790	€/a
Betriebskosten	434.383	
Summe der Gesamtkosten	707.173	€/a
spezifische Aufbereitungskosten	5,05	€/Mg FS

5.2.2 Einfluss der Erlöse und Entsorgungskosten

Anhand einer Sensitivitätsanalyse sollen nachfolgend die Faktoren herausgefiltert werden, welche die Wirtschaftlichkeit des Aufbereitungsverfahrens im Wesentlichen beeinflussen.

Im Rahmen von Recherchen zur Preisermittlung von Recyclingbaustoffen sind, abhängig von der Qualität für Kies- und Sandprodukte, prinzipiell Erlöse zwischen 5 €/Mg bis 13 €/Mg (Stand 09/2016) erzielbar. Mit dem Erreichen einer Erlössituation für den Schwergut- und Feingutaustrag könnten die spezifischen Aufbereitungskosten gesenkt werden. Mineralische Stoffströme, die als Recyclingbaustoff eingesetzt werden können, unterliegen jedoch einer mangelnden Nachfrage am Markt. So greift auch die öffentliche Hand als größter Bauherr bei Ihren Ausschreibungen in der Regel auf Primärrohstoffe zurück (Arenz, 2015).

Die Ausschleusung von Metallen aus dem Schwergut dient vorrangig der Verbesserung der Produkteigenschaften des Schwergutaustrages. Sie sind mengenmäßig von geringer Bedeutung und weisen darüber hinaus eine minderwertige Qualität auf. Metalle sind daher hinsichtlich der Erlössituation kaum von Relevanz. Diese Erkenntnis deckt sich auch mit Angaben aus der Literatur (Krüger et al., 2016; Hölzle, 2010b; Gosten, 2009; DWA, 2012).

Die Abscheidung von Glas erfolgt ebenso vor dem Hintergrund der Qualitätssteigerung des Schwergutaustrages. Eine hochwertige stoffliche Verwertung des Glases, z. B. als Behälterglas, ist gemäß der „Produktspezifikationen für Sammelware Hohlglas“ des Bundesverbandes für Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V. (BVSE, 2013) kaum realistisch. Eine stoffliche Nutzung ergibt sich möglicherweise als Glasschaumschotter im Straßenbau (Meyer und Emersleben, 2010) oder als Schaumglas zur Wärmedämmung (Scheelhaase et al., 2008).

In Abhängigkeit der Produktqualität und massenbeding beeinflusst insbesondere der Schwergutaustrag die Wirtschaftlichkeit der Feinaufbereitung (siehe Abbildung 5-2).

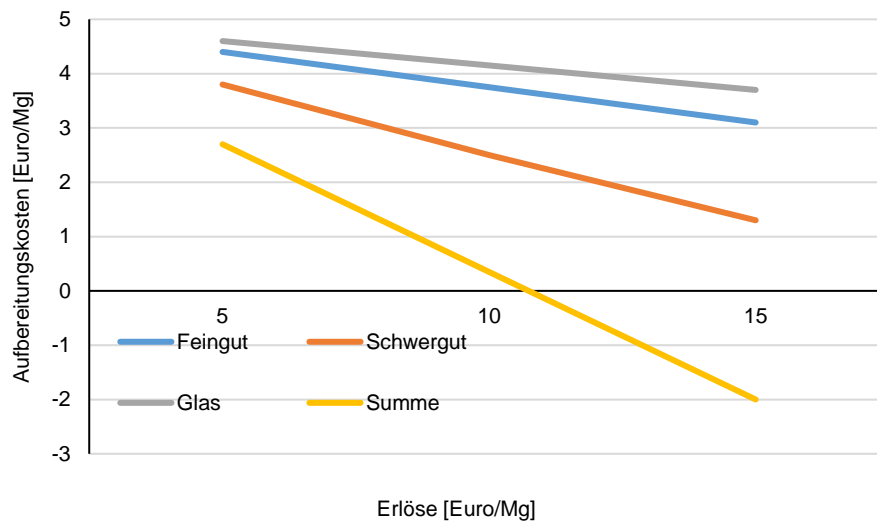


Abbildung 5-2: Variation der Erlöse inerter Stoffströme

Die Abgabe des Leichtgutaustrages an beispielsweise EBS-Kraftwerke ist mit Zuzahlungen seitens des Erzeugers mit etwa 50 € pro Tonne (Krüger et al., 2016) verbunden, womit das erzeugte Leichtgut eine wesentliche Einflussgröße hinsichtlich der spezifischen Betriebskosten ausübt. Eine Reduktion der Abgabepreise für Ersatzbrennstoffe würde sich massiv auf die Kosten des Rückbaus auswirken (Krüger et al., 2016; Scheffold, 2011). Der Einfluss der Werthaltigkeit des Leichtgutaustrages auf die Aufbereitungskosten der Feinfraktion ist dazu in der Abbildung 5-3 dargestellt.

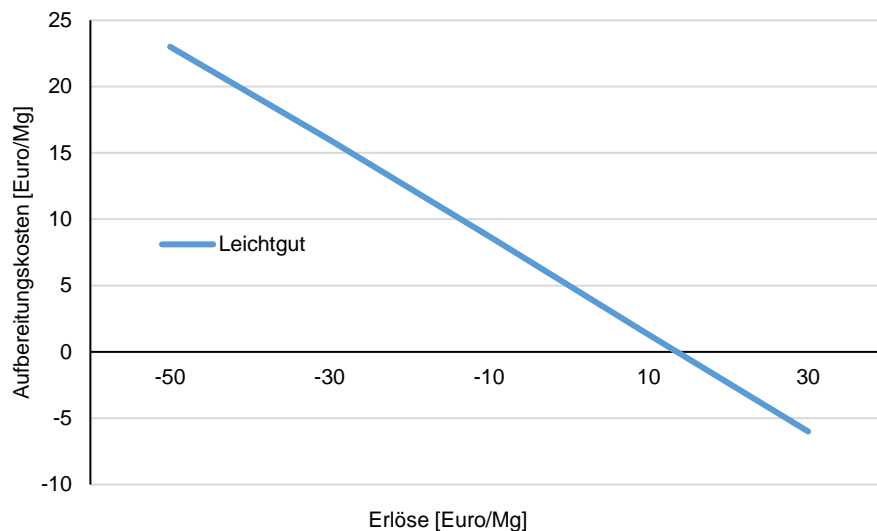


Abbildung 5-3: Variation der Verwertungskosten/ Erlöse des Leichtgutaustrages

5.2.3 Wirtschaftliche Bedeutung der Gewinnung von Deponievolumen und des Flächenrecyclings

Durch die Aufbereitung des Deponates bzw. die Entnahme von Wertstoffen aus dem Deponat kann als Folge des Deponierückbaus neues Deponievolumen geschaffen werden. Das gewonnene Volumen kann für zukünftige Ablagerungen genutzt und dadurch auf die Erschließung neuer Deponiestandorte gegebenenfalls verzichtet werden. Erfolgt ein vollständiger Rückbau des Deponiekörpers vor dem Hintergrund der höherwertigen Flächennutzung kann sich insbesondere in dicht besiedelten Ballungsräumen ein ökonomischer Vorteil ergeben. Eine theoretische Betrachtung zum Volumengewinn infolge von Deponierückbaumaßnahmen für unterschiedliche Aufbereitungsszenarien befindet sich dazu in Anlage 8-35.

Die Auswirkung des Deponievolumenwertes als wesentliche Einflussgröße auf die Aufbereitungskosten am Beispiel der Feinfraktion zeigt Abbildung 5-4. Für die Sensitivitätsanalyse wird angenommen, dass sämtliche Austragsgüter aus der Aufbereitung des Feinmaterials 10 - 60 mm einer Verwertung zugeführt werden, wodurch in Anlehnung an Anlage 8-35 eine Reduktion des ursprünglichen Volumens des Aufgabegutes von 50 % veranschlagt wird. Der Volumengewinn infolge der Aufbereitung der Grobfraktion > 60 mm wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt, da die Grobaufbereitung außerhalb des Bilanzrahmens liegt.

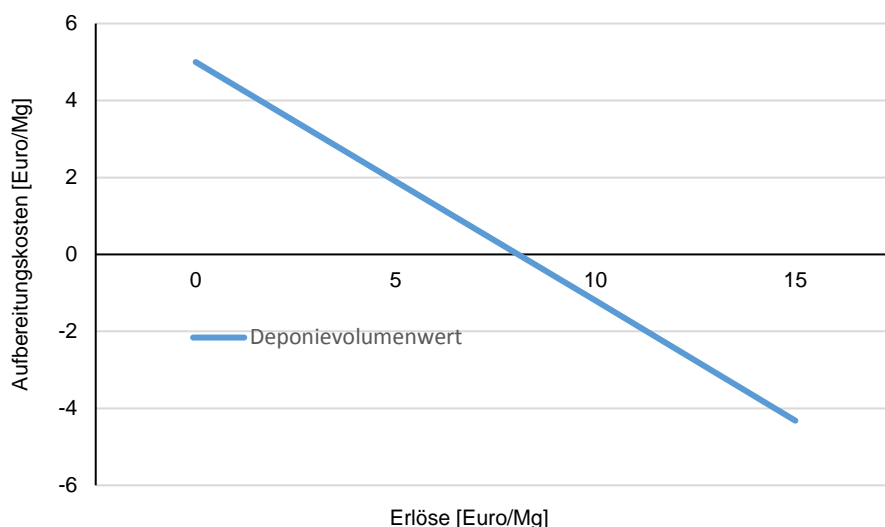


Abbildung 5-4: Variation des Deponievolumenwertes

5.2.4 Variation verschiedener Einflussgrößen auf die Wirtschaftlichkeit der Feinaufbereitung

In Tabelle 5-6 sind verschiedene Szenarien hinsichtlich der Erlössituation aus der Verwertung der Stoffströme und dem Volumengewinn gegenübergestellt. Szenario 1 bildet dabei die spezifischen Aufbereitungskosten ohne Verwertung der Stoffströme gemäß Kapitel 5.2.1 ab. Das Szenario 2 und Szenario 3 berücksichtigt beispielhaft Erlöse (-), insbesondere für den Leichtgutaustag und dem Volumengewinn als wesentliche Einflussgrößen. Unter Annahme der Randbedingungen des Szenarios 3 wobei die Kosten für die Abgabe der heizwertreichen Fraktionen sinken bei einer gleichzeitigen Steigerung des Deponievolumenwertes resultiert aus der nassmechanischen Aufbereitung des Feinmaterials 10 - 60 mm eine ökonomisch vorteilhafte Situation.

Tabelle 5-6: Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Aufbereitungsszenarien

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erlöse/Aufwendungen	Euro/ Mg		
Feingut	0	-5	-5
Schwergut	0	-5	-5
Leichtgut	0	50	30
Glas	0	-5	-5
Volumengewinn	-	-5	-25
Aufbereitungskosten	5	18	-1,8

5.3 Ökologische Bewertungen des Konzeptes

Die Bewertung der Umweltauswirkung der nassmechanischen Aufbereitung erfolgte Anhand der Wirkungskategorien Treibhauspotenzial, Versauerungspotenzial und kumulierter fossiler Energieaufwand, welche gut modellierbar sind und die ökologischen Auswirkungen von Abfallwirtschaftssystemen gut beschreiben. Als funktionelle Einheit findet eine Tonne verarbeitetes Aufgabegut anwendung. Die verwendeten Datensätze sind in der Anlage 8-38 zusammengefasst.

Betrieb der Anlage zur nassmechanischen Aufbereitung

In Tabelle 5-7 sind zunächst die von der Aufbereitungsanlage ausgehenden Umweltauswirkungen, unterteilt nach Produktionsphase, Betriebsphase und End of Life- Phase, dargestellt. Anhand der Berechnungsergebnisse wird ersichtlich, dass die Umweltauswirkungen infolge der Produktion und der Beseitigung nach dem Ende der Lebensdauer in der Gesamtbilanz vernachlässigbar sind. Die Ursache dafür resultiert aus dem geringen Materialeinsatz der zur Herstellung der Aufbereitungsaggregate notwendig ist gegenüber dem Massenstrom des Aufgabegutes, der innerhalb der Lebensdauer verarbeitet wird. Die größten Umweltauswirkungen gehen von der Aufbereitungsanlage während der Betriebsphase aus. Insgesamt entstehen

während der nassmechanischen Aufbereitung der Fraktion 10 - 60 mm mittels Nasssetzmaschine Umweltbelastungen in Größenordnungen, wie sie auch bei der Aufbereitung von Betonbrechsand unter ähnlichen Verfahrensprinzip und Randbedingungen ermittelt wurden (Weimann, 2009).

Tabelle 5-7: Umweltbelastungen der Aufbereitungsanlage

	Produktion	Betrieb	End of Life	Gesamt
Versauerungspotenzial [kg SO ₂ -Äq/t FS]	2,79E-04	2,91E-03	9,09E-06	3,20E-03
Treibhauspotenzial [kg CO ₂ -Äq/t FS]	7,24E-02	1,91E+00	1,67E-03	1,98E+00
KEA-fossil [MJ-Äq/t FS]	1,26E+00	3,28E+01	3,65E-02	3,41E+01

Infolge des Betriebes der Aufbereitungsanlage entstehen Umweltauswirkungen in Form von Lasten, resultieren aus dem Verbrauch von elektrischer Energie- und Frischwasser sowie aus der Abwasseraufbereitung (Tabelle 5-8). Der Verbrauch elektrischer Energie wird insbesondere durch den Schwertwäscher, die Nasssetzmaschine und die Zentrifuge zur Abwasseraufbereitung bestimmt. Die Umweltbelastungen aus der Frischwasserzugabe und der Abwasseraufbereitung fallen vergleichsweise gering aus, da das Prozesswasser im Kreislauf gefahren wird und nur ein geringer Anteil Frischwasser zugeführt werden muss.

Tabelle 5-8: Umweltbelastungen während der Betriebsphase

	Strom-verbrauch	Frischwasserbedarf	Abwasseraufbereitung	Gesamt
Versauerungspotenzial [kg SO ₂ -Äq/t FS]	2,54E-03	6,82E-05	3,06E-04	2,91E-03
Treibhauspotenzial [kg CO ₂ -Äq/t FS]	1,86E+00	1,68E-02	3,56E-02	1,91E+00
KEA-fossil [MJ-Äq/t FS]	3,17E+01	5,96E-01	5,37E-01	3,28E+01

Verwertung und Beseitigung der erzeugten Stoffströme aus der nassmechanischen Aufbereitung

Die aus der Verwertung bzw. Beseitigung der erzeugten Stoffströme resultierenden Umweltauswirkungen werden nachfolgend betrachtet. Tabelle 5-9 fasst zunächst die Umweltauswirkungen infolge der Deponierung der Reststoffe aus der Abwasseraufbereitung und der Sandwäsche zusammen. Die Lasten aus der Beseitigung der Reststoffe wirken sich insgesamt aufgrund der geringen Massenanteile nur gering aus.

Tabelle 5-9: Umweltauswirkungen durch die Beseitigung der Reststoffe

	Abwasser-aufbe- reitung	Sandwäsche	Gesamt
Versauerungspotenzial [kg SO ₂ -Äq/t FS]	3,24E-02	3,49E-02	6,72E-02
Treibhauspotenzial [kg CO ₂ -Äq/t FS]	1,63E-04	1,75E-04	3,38E-04
KEA-fossil [MJ-Äq/t FS]	3,25E-05	3,49E-05	6,74E-05

Die Verwertung des Leichtgutaustrages im EBS-Kraftwerk erzeugt zunächst Umweltbelastungen durch den Verbrennungsvorgang und führt zu Entlastungen durch die Nutzung des Stromes und der Wärmeenergie. Die Bilanz der Umweltauswirkungen infolge der thermischen Behandlung des Leichtgutaustrages und Nutzung der freiwerdenden Energie unter Beachtung der genannten Randbedingungen ist in Tabelle 5-10 dargestellt. Insgesamt führt die thermische Verwertung des Leichtgutaustrages zu einer Entlastung hinsichtlich des Versauerungspotenziales und des kumulierten fossilen Energieaufwandes. Belastungen resultieren zusätzlich aus dem Freiwerden von klimawirksamen Gasen während des Verbrennungsvorganges.

Tabelle 5-10: Umweltauswirkungen durch die Verwertung des Leichtgutaustrages

	EBS – Kraftwerk	Strom-pro- duktion	Wärme-pro- duktion	Gesamt
Versauerungspotenzial [kg SO ₂ -Äq/t FS]	1,59E-03	-3,72E-04	-3,69E-01	-3,67E-01
Treibhauspotenzial [kg CO ₂ -Äq/t FS]	2,04E+00	-2,73E-01	-6,22E-08	1,77E+00
KEA-fossil [MJ-Äq/t FS]	7,40E+00	-4,65E+00	-5,88E+00	-1,05E+01

Der Schwergut- und Feingutaustrag wird einer Verwertung zugeführt, wodurch der Abbau von Primärrohstoffen eingespart und als Gutschrift bilanziert wird. Die Separierung des Glases aus dem Deponat wird als Gutschrift bilanziert wodurch dieses dem Wirtschaftskreislauf zur Verfügung steht. Ist keine höherwertige Verwertung des Glases möglich, kann dieses als Baustoff verwendet werden wodurch ebenfalls Primärrohstoffe substituiert werden können (Meyer und Emersleben, 2010). Tabelle 5-11 stellt die Umweltwirkungen infolge der Verwertung der Schwergut- und Feingutausträge sowie des Glases gegenüber. Relevante Entlastungen können dabei für die Wirkkategorien Treibhauspotenzial und KEA-fossil erreicht werden.

Tabelle 5-11: Umweltauswirkungen durch die Verwertung des Schwer- und Feingutaustrages sowie des Glases

	Schwergutaustrag als Kies	Feingutaustrag als Sand	Glas	Gesamt
Versauerungspotenzial [kg SO ₂ -Äq/t FS]	-8,13E-03	-3,02E-03	-1,67E-02	-2,78E-02
Treibhauspotenzial [kg CO ₂ -Äq/t FS]	-1,22E+00	-4,00E-01	-2,49E+00	-4,11E+00
KEA-fossil [MJ-Äq/t FS]	-3,82E+01	-9,63E+00	-4,30E+01	-9,09E+01

Gesamte Umweltauswirkungen der nassmechanischen Aufbereitung

In der Tabelle 5-12 sind die Umweltauswirkungen der einzelnen Lebensphasen sowie aus der Verwertung und Beseitigung der anfallenden Stoffströme zu einer Gesamtbilanz zusammengefasst.

Tabelle 5-12: Gesamtbilanz der Umweltauswirkungen

	Aufbereitungs- anlage	Verwertung/ Beseitigung der erzeugten Stoff- ströme	Gesamtbilanz
Versauerungspotenzial [kg SO ₂ -Äq/t TS]	3,20E-03	-3,28E-01	-3,25E-01
Treibhauspotenzial [kg CO ₂ -Äq/t TS]	1,98E+00	-2,34E+00	-3,56E-01
KEA-fossil [MJ-Äq/t TS]	3,41E+01	-1,01E+02	-6,73E+01

Dem Treibhauspotenzial wird innerhalb der ökobilanziellen Betrachtung eine sehr hohe Bedeutung zugeordnet (Krüger et al., 2016). In der Gesamtbilanz führt die nassmechanische Aufbereitung der Fraktion 10 - 60 mm zu einer geringen Entlastung hinsichtlich der Emission klimarelevanter Gase bezogen auf den Aufbereitungsvorgang. Infolge der Verwertung der erzeugten Stoffströme steht der Aufbereitung einer Tonne des Aufgabegutes die Ersparnis von 0,356 kg CO₂-Äquivalente gegenüber (Abbildung 5-5).

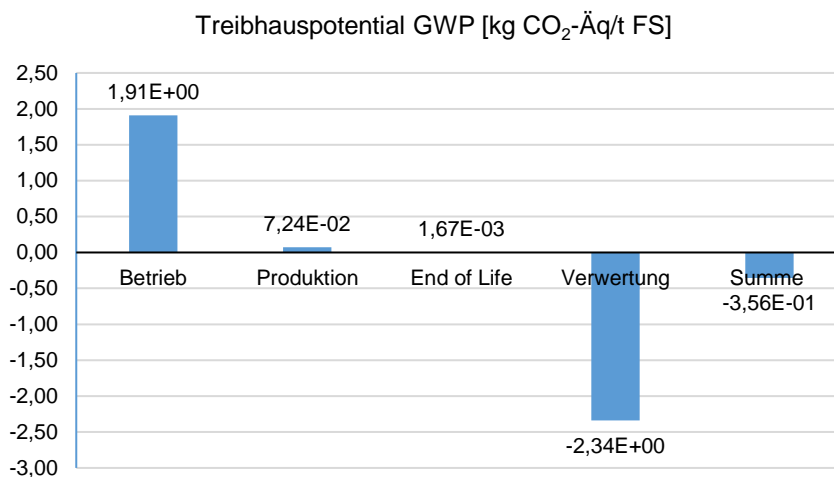


Abbildung 5-5: Ökologische Auswirkungen „Treibhauspotenzial“

Dem Versauerungspotenzial wird innerhalb der ökobilanziellen Betrachtung eine hohe Bedeutung zugeordnet (Krüger et al., 2016). In der Gesamtbilanz ergibt sich für die nassmechanische Aufbereitung der Fraktion 10 - 60 mm eine geringe Entlastung. Infolge der Verwertung der erzeugten Stoffströme steht der Aufbereitung einer Tonne des Aufgabegutes die Ersparnis von 0,325 kg SO₂- Äquivalente gegenüber (Abbildung 5-6).

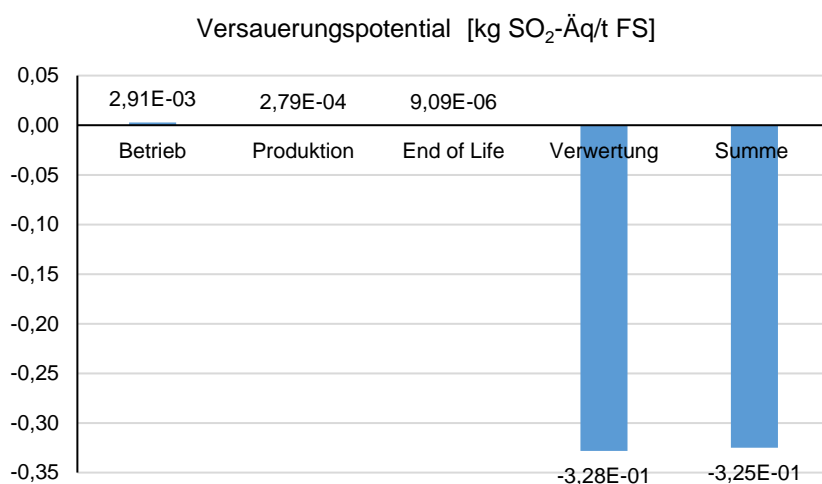


Abbildung 5-6: Ökologische Auswirkungen „Versauerungspotenzial“

Dem kumulierten fossilen Energieaufwand wird innerhalb der ökobilanziellen Betrachtung eine mittlere Bedeutung zugeordnet (Krüger et al., 2016). Entsprechend der Tabelle trägt die nassmechanische Aufbereitung der Fraktion 10 - 60 mm zur Schonung fossiler Energieträger bei. Infolge der Verwertung der erzeugten Stoffströme steht der Aufbereitung einer Tonne des Aufgabegutes die Ersparnis von 67,1 MJ-Äquivalente, entspricht ca. 2,2 kg Steinkohleeinheiten, fossiler Energieträger gegenüber (Abbildung 5-7).

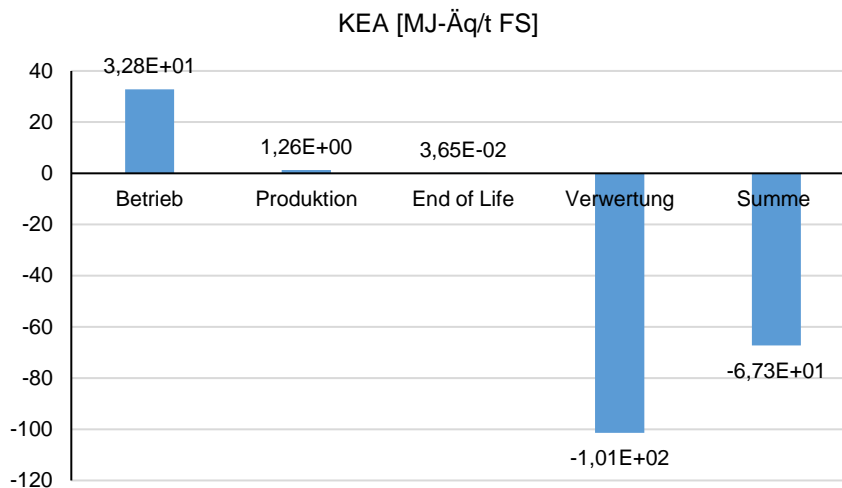


Abbildung 5-7: Ökologische Auswirkungen „KEA-fossil“

Fazit

Das Ergebnis der ökobilanziellen Betrachtung zeigt, dass die nassmechanische Aufbereitung der Fraktion 10 - 60 mm, unter Beachtung der Randbedingungen, zu einem ökologischen Vorteil führen kann. Die Voraussetzung dafür bildet dabei die Verwertung der erzeugten Stoffströme. Im Allgemeinen wird die ökologische Vorteilhaftigkeit von Deponierückbaumaßnahmen mit dem Ziel der Wertstoffgewinnung durch einen hohen Wertstoffgehalt im Deponat und Produktströme mit hohen Qualitäten begünstigt, die als Substitut für Primärrohstoffe eingesetzt werden können. Ebenso spielt der Wirkungsgrad der Anlagen zur thermischen Verwertung des Leichtgutaustrages eine wesentliche Rolle (Krüger et al., 2016).

Die Feinaufbereitung stellt neben der Grobaufbereitung und der Wiederablagerung von Reststoffen innerhalb einer Deponierückbaumaßnahme einen relevanten Teilaspekt dar. Auswirkungen, die im Rahmen von Deponierückbaumaßnahmen auch aus der Aufbereitung der Feinfraktion resultieren, wie beispielsweise die Schaffung von Deponievolumen oder möglicherweise die Reduktion der Nachsorgedauer, erfordert eine Erweiterung des Bilanzrahmens und können somit nicht diskutiert werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die nassmechanische Aufbereitung der Feinfraktion mittels Setzbetttechnik leistet einen wesentlichen Beitrag im Rahmen von Deponierückbaumaßnahmen. Anhand der durchgeführten Versuche im halbertechnischen Maßstab sollte zunächst die Eignung des Aufbereitungsverfahrens bewertet werden. Weiterhin wurden die erzeugten Stoffströme unter dem Aspekt der Verwertbarkeit betrachtet. Anhand der Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen konnte abschließend ein Aufbereitungskonzept für die großtechnische Anwendung entwickelt und dieses ökonomisch sowie ökologisch bewertet werden.

Anhand der Versuchsdurchführungen konnten nachgewiesen werden, dass die nassmechanische Aufbereitung von Deponat < 60 mm mittels Nasssetzmaschine zur Erzeugung von inerten Stoffströmen in Form eines Schwergut- und Feingutaustrages sowie einer heizwertreichen Fraktion möglich ist. Vor dem Hintergrund der Verwertbarkeit des Leichtgutaustrages wird empfohlen, die Bodenfraktion < 10 mm vor der nassmechanischen Aufbereitung abzutrennen (Kapitel 4.2).

Das Abscheiden der Bodenfraktion wirkt sich aus verfahrenstechnischer Sicht positiv auf den Aufbereitungsprozess aus, da der Feststoffgehalt im Waschwasser gesenkt und damit die Einsatzzyklen des Prozesswassers in der Kreislaufführung erhöht werden können (siehe auch Kapitel 4.6). Ebenso wird die Sortiergüte des Aufbereitungsprozesses und die Produktqualität der Austragsgüter durch das Vorabsieben der Bodenfraktion gesteigert.

Der Schwergutaustrag 10 - 60 mm weist insgesamt geringe Schadstoffkonzentrationen auf und entspricht den Zuordnungskriterien der Klasse Z1.1 bis Z2 nach LAGA M 20 (2012) beziehungsweise den Klassen RC1 bis RC 3 gemäß TL-Gestein (2007), womit ein Einsatz des Schwergutaustrages als Baustoff unter Umweltaspekten möglich ist. Hinsichtlich der bautechnischen Anforderungen stellen der Fremdstoffgehalt (z.B. Kunststoffe, Holz, Textilien) und der Widerstand gegenüber Frostbeanspruchung, bedingt durch die Anwesenheit von Gips und Beton, kritische Parameter dar. Ein direkter Einsatz des Schwergutaustrages im Straßenbau oder im Erdbau des Straßenbaus ist somit ohne weitere Aufbereitung nicht möglich. Eine Reduktion der oben genannten Fremdstoffe ist durch den Einsatz geeigneter Sortiertechnik möglich.

Der Feingutaustrag entspricht den Zuordnungskriterien der Klasse Z2 nach LAGA M 20 beziehungsweise der Klasse RC 3 nach TL-Gestein. Einen kritischen Parameter stellt vor allem der Sulfatgehalt dar. Ebenso wie bei dem Schwergutaustrag stellt der Fremdstoffgehalt und der Widerstand gegenüber der Frostsicherheit kritische Parameter im Bereich der bautechnischen

Anforderungen dar. Der Einsatz des Feingutaustrages für Anwendungen im Bereich des Straßenbaus erfordert eine weitere Aufbereitung dieses Stoffstromes. Eine Möglichkeit die kritischen Parameter zu beeinflussen stellt die Sandwäsche dar.

Der Leichtgutaustrag ist aufgrund seiner stofflichen Zusammensetzung und physikalisch-chemischen Eigenschaften für eine energetische Verwertung in EBS-Kraftwerken geeignet. Kritische Parameter stellen materialbedingt die Parameter Chlor- und Schwefel dar. Die höherwertige Verwertung des Leichtgutes in Zementkraftwerken ist aufgrund der Schadstoffgehalte des Leichtgutaustrages nach jetzigem Kenntnisstand ohne weiterführende Konfektionierungsschritte auszuschließen.

Die Bodenfraktion < 10 mm kann in Abhängigkeit von ihrer Beschaffenheit einer Aufbereitung zugeführt werden, stofflich verwertet werden oder muss einer Beseitigung, zum Beispiel in Form einer Wiederablagerung, zugeführt werden. Die untersuchte Bodenfraktion entspricht dabei hinsichtlich ihrer Schadstoffbelastung, mit Ausnahme des Glühverlustes und TOC-Gehaltes, den Ablagerungskriterien gemäß Deponieverordnung für Material zur Deponierung auf der Deponieklasse DK I.

Das entwickelte Konzept zur nassmechanischen Aufbereitung von Feinmaterial beinhaltet zusätzlich Aggregate, die der Vorkonditionierung und der Konfektionierung der verschiedenen Stoffströme dienen. Der Nachweis, inwieweit die zur Vorkonditionierung des Aufgabegutes ausgewählten Schwertwäscher oder wahlweise Läutertrommeln für die Aufbereitung des Aufgabegutes geeignet sind, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht erbracht. Hierzu sind weitere Untersuchungen notwendig, da diese Aggregate für Anwendungsgebiete und Stoffströme konzipiert wurden, die sich von dem hier verwendeten Aufgabegut unterscheiden können. Der Einsatz von Sandwäschern, Magnetscheidern und optischen Sortieraggregaten zur Konfektionierung der erzeugten Stoffströme entspricht hingegen dem Stand der Technik. Im Hinblick auf die praktische Umsetzung des Aufbereitungsverfahrens im großtechnischen Maßstab sind weitere Untersuchungen denkbar, zum Beispiel zur Optimierung des Setzprozesses durch Variation der Maschinenparameter.

Für die nassmechanische Aufbereitung fallen spezifische Kosten von 5 Euro pro Tonne Aufgabegut an, hierbei sind Erlöse bzw. Aufwendungen aus der Verwertung und/oder Beseitigung der Austragsgüter zunächst nicht berücksichtigt. Sensitivitätsanalysen zeigen, dass massenbedingt insbesondere den Verwertungskosten für die Leichtfraktion und möglichen Erlöse aus der Verwertung des Schwergutes bzw. dem geschaffenen Deponievolumen hohe wirtschaftliche Relevanz zukommt.

Unter Beachtung der getroffenen Randbedingungen wirkt sich die nassmechanische Aufbereitung des Feinmaterials ökologisch Vorteilhaft aus. Wesentliche Faktoren, die die Umweltauswirkungen des Aufbereitungsverfahrens begünstigen, sind der Wertstoffgehalt im Aufgabegut sowie die Qualitäten der erzeugten Stoffströme und die daraus resultierenden Verwertungsmöglichkeiten. Von der Aufbereitungsanlage selbst gehen nur geringe Umweltbelastungen aus.

Das wesentliche Ziel der nassmechanischen Aufbereitung liegt zunächst in der Erzeugung von Stoffströmen, die einer Verwertung zugeführt werden können. Durch die Entnahme von verwertbaren Stoffströmen aus dem Deponat beziehungsweise durch den verdichteten Wiedereinbau nicht verwertbarer Reststoffe kann neues Deponievolumen geschaffen werden. Am Beispiel der Deponie Pohlsche Heide beträgt der Volumengewinn durch die Umlagerung des gesamten Deponates infolge der verdichteten Wiederablagerung des Deponates ca. 23 Vol.-% (Anlage 8-35). Der verdichtete Wiedereinbau der Feinfraktion < 60 mm führt insgesamt zu einem Volumengewinn von ca. 47 Vol.-%. Infolge der Aufbereitung der Feinfraktion ergibt sich unter der Annahme, dass lediglich die Fraktion < 10 mm einer Wiederablagerung zugeführt wird, ein Volumengewinn von ca. 76 Vol.-%.

Die Aufbereitung der Feinfraktion 10 - 60 mm stellt jedoch innerhalb von Deponierückbaumaßnahmen einen wesentlichen Teilaspekt dar. Der gesamte Nutzen einer Deponierückbaumaßnahme im ökonomischen sowie ökologischen Sinn wird durch die Zielstellung definiert, vor welcher die Rückbaumaßnahme durchgeführt wird. Hierzu zählt beispielsweise die Erzeugung verwertbarer Stoffströme infolge der Aufbereitung der Grob- und Feinfraktion in Verbindung mit der Schaffung von Deponievolumen, der Reduktion der Nachsorgekosten oder beispielsweise einer alternativen Flächennutzung. Da der vollständige Rückbau einer Deponie mit dem Hauptziel einer alternativen Flächennutzung eher einen seltenen Anwendungsfall darstellt wird der Schaffung von Deponievolumen, vor dem Hintergrund fehlender Deponiekapazitäten (EU-WID, 2016a; EUWID, 2016b; Haeming, 2016), ein hoher Stellenwert beigemessen.

Deponiebürtige Stoffströme zur Verwertung sind in bestehenden gesetzlichen Regelwerken bzw. Entwürfen (z. B. Ersatzbaustoffverordnung) nicht eindeutig definiert und eine Verwertung dieser Stoffströme wird aufgrund der fehlenden Rechtssicherheit als schwierig angesehen. Eine entsprechende Anpassung der rechtlichen Situation bildet eine Voraussetzung für das Funktionieren von Deponierückbaumaßnahmen in Deutschland.

Die Fragestellung ob eine Deponierückbaumaßnahme durchgeführt und welche Technik eingesetzt werden sollte ist generell abhängig vom Deponiestandort und Bedarf einer Einzelfallprüfung. Innerhalb der Deponierückbaumaßnahme stellt die Aufbereitung der Feinfraktion einen bedeutenden Teilschritt dar, der jedoch aufgrund des hohen Massenanteiles der Feinfrak-

tion einen wesentlichen Einfluss auf die ökonomisch/ ökologische Vorteilhaftigkeit der Rückbaumaßnahme ausüben kann. Die Voraussetzung für die umfassende Gewinnung von verwertbaren Stoffströmen aus Deponien ist die Kombination der Verfahren zur Aufbereitung der Grob- und Feinfraktion. Durch die weitestgehende Entnahme und Nutzung werthaltiger Stoffen aus dem Deponat kann beispielsweise neues Deponievolumen geschaffen und ein wesentlicher Beitrag zur Entsorgungssicherheit geleistet werden.

Anlagen zur nassmechanischen Aufbereitung können im Rahmen von Deponierückbaumaßnahmen neben der Aufbereitung des Deponates weiterhin zur Aufbereitung von Bauschutt oder baulichen Komponenten des Deponiekörpers, wie beispielsweise mineralischer Komponenten aus Entwässerungs- oder Dichtungsschichten eingesetzt werden um diese einer Wiederverwertung zuführen zu können.

7 Literatur

ABWV, 2014. *Verordnung über Anforderungen über das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV). Abwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. September 2014 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist. AbwV.*

AfA, 1995. *AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig "Abfallentsorgungs- und Recyclingwirtschaft"* [online]. 11. August 2016, 12:00. Verfügbar unter: http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Stuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/1995-07-01-afa-27.pdf?__blob=publicationFile&v=3

AGEB, 2016. *Struktur des Primärenergieverbrauchs in Deutschland nach Energieträger im Jahr 2015* [online]. 10. August 2016, 12:00 [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/251525/umfrage/struktur-des-primaeernergieverbrauchs-in-deutschland-nach-energetraeger/>

AGS, 09.2013. Versuchsaufbau Pohlsche Heide. E-Mail.

AHLERT, A., F. HOFFMANN, H. WALTER, J. BUHL, K. GREIFF, M. LETTENMEIER, C. LIEBKTE, M. SCHIPPERS, S. STEGER und J. TEUBLER, 2015. *Global nachhaltige materielle Wohlstandsniveaus – Analyse und Veranschaulichung global nachhaltiger materieller Versorgungspfade auf der Ebene von Haushalten FKZ 3711 14 105* [Online] [Zugriff am: 12. August 2016]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_99_2015_global_nachhaltige_materielle_wohlstandsniveaus.pdf

ANDRUEIT, H., H.G. BABIES, A. BAHR, J. KUS, J. MEßNER und M. SCHAUER, 2012. *Energiestudie 2012. Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen*. Hannover.

ARENZ, M., 2015. Recycling- Baustoffe. Warum einsetzen und wie? *Müll und Abfall*, 47(10), 536-538.

BAHADIR, M. und D. ANGERHÖFER, Hg., 2000. *Springer Umweltlexikon*. 2. Aufl. Berlin: Springer. ISBN 3-540-63561-0.

BECKMANN, M. und M. HORENI, 2002. Bewertungskriterien für den Einsatz von Sekundärbrennstoffen. In: B. BILITEWSKI, Hg. *7. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung. [5. bis 7. März 2002 in Berlin]*. Pirna: Forum für Abfallwirtschaft und Altlasten e.V., S. 154-174. ISBN 3-934253-09-1.

Bergbau- Archiv.

BERNHARD, A., M. DOMENIG, H. REISINGER, B. WALTER und T. WEIßENBACH, 2011. *DEPONIERÜCKBAU. Wirtschaftlichkeit, Ressourcenpotenzial und Klimarelevanz* [Online]. Wien [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: http://www.deponie-stief.de/pdf/fachlit_pdf/2011deponierueckbau_UBA-AT_02_komp.pdf

BILITEWSKI, B. und G. HÄRDTLE, 2013. *Abfallwirtschaft. Handbuch für Praxis und Lehre* [Online]. 4., aktualisierte und erw. Aufl. Berlin: Springer. ISBN 978-3-540-79530-8. Verfügbar unter: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10695455>

BILITEWSKI, B. und H. CONRAD, 1995. Lohnt sich der Deponierückbau? Untersuchungen in den neuen Bundesländern. In: *Abfallwirtschafts-Journal. Vermeidung, Verwertung und Behandlung von Abfällen ; Fachzeitschrift für Vermeidung, Verwertung und Behandlung von Abfällen*. Wiesbaden: Vieweg, S. 71-75. ISBN 0934-6422.

BIMSCHV, 2013. *Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen - 17. BImSchV), Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 1021, 1044, 3754). 17. BImSchV.*

BIOABFV, 2012. *Bioabfallverordnung. (BioAbfV) ; Textausgabe mit amtlicher Begründung zur Novelle 2012.* Dresden: SV Saxonia-Verl. für Recht Wirtschaft und Kultur. ISBN 9783939248361.

BMUB, 2015. *Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und zur Neufassung der Bundes- Bodenschutz- und Altlastenverordnung- 3. Arbeitsentwurf vom 23.07.2015* [Online] [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Bodenschutz/mantelv_entwurf_3_bf.pdf

BOCKREIS, A. und A. KNAPP, 2013. *Landfill Mining Ökonomische und ökologische Betrachtung der Deponie Riederberg* [Online]. Innsbruck [Zugriff am: 12. August 2016]. Verfügbar unter: https://www.tirol.gv.at/fileadmin/themen/umwelt/abfallwirtschaft/downloads/landfill_mining_riederberg.pdf

BOCKREIS, A. und J. KNAPP, 2011. Landfill Mining – Deponien als Rohstoffquelle [online]. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 63(3-4), 70-75. ISSN 0945-358X. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00506-010-0275-1

BOLLWIEN, K., 1994. Umlagerung einer Deponie - Beispiel Stadt Wolfsburg. In: *Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft*. Stuttgart: Verl. Abfall Aktuell; Economica-Verl., S. 21-219.

BRAMMER, F., M. BAHADIR, C.J. COLLINS, H.H. HANERT und E. KOCH, 1997. *Rückbau von Siedlungsabfalldeponien*. Stuttgart: Teubner. Teubner-Reihe Umwelt. ISBN 3815435315.

BRIESE, D. und A. HERDEN, 2014. Markt für Sekundärrohstoffe in der Baustoffindustrie bis 2020. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY, Hg. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle: Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen*. Neuruppin: TK, S. 117-128. ISBN 978-3-944310-11-4.

BUCHERT, M., V. USTOHALOVA, G. MEHLHART, F. SCHULZE und R. SCHÖNE, 2013. *Landfill Mining. Option oder Fiktion?* [Online]. Darmstadt [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: <http://www.oeko.de/oekodoc/1802/2013-479-de.pdf>

BURLAKOV, J., M. KRIIPSALU, M. KLAVINS, A. BHATNAGAR, Z. VINCEVICA-GAILE, J. STENIS, Y. JANI, V. MYKHAYLENKO, G. DENAFAS, T. TURKADZE, M. HOGLAND, V. RUDOVICA, F. KACZALA, R.M. ROSENDAL und W. HOGLAND, 2016. Paradigms on landfill mining [online]. From dump site scavenging to ecosystem services revitalization. *Resources, Conservation and Recycling*. ISSN 09213449. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.resconrec.2016.07.007

BVSE, 2013. *Produktspezifikation Sammelware Hohlglass- Misch* [online]. TR 205 [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: http://www.bvse.de/342/496/7__Altglas_Qualitaetskriterien__Produktspezifikationen

BWK, 2009. *Das Energie Fachmagazin* [online]. *Im Jahr 2008 prognostizierte statische Reichweite von Ressourcen (in Jahren)*. 10 August 2016, 12:00 [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/152334/umfrage/statische-reichweite-von-ressourcen/>

BWT, 2013. *Stoffkreislauf im Mauerwerksbau - Nachhaltigkeitsanalyse für das Mauerwerksrecycling. Schlussbericht Forschungsvereinigung Porenbetonindustrie e.V. Vorhaben 17022 N* [Online] [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: https://old.bam.de/server/get.php?host=de/kompetenzen/fachabteilungen/abteilung_7/fb74/fb74_medien/fb74_schlussbericht_igf_vorhaben_17022_n_sim.pdf

CHIEMCHAISRI, C., B. CHARNNOK und C. VISVANATHAN, 2010. Recovery of plastic wastes from dumpsite as refuse-derived fuel and its utilization in small gasification system [online]. *Bioresource technology*, 101(5), 1522-1527. ISSN 0960-8524. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.biortech.2009.08.061

COSSU, R., G. MOTZO und M. LAUDADIO, 1995. Preliminary study for a landfill mining project in Sardinia. In: ENVIRONMENTAL SANITARY ENGINEERING CENTRE, Hg. *5 th International Waste Management and Landfill Symposium*.

Darmstadter Massivbau-Seminar. Kreislaufgerechtes Bauen im Massivbau, 1997. Band 18.

DEIKE, R., D. EBERT, D. SCHUBERT, R. ULUM, R. WARNECKE und M. VOGELL, 2013. Recyclingpotentiale von Metallen aus der Abfallverbrennung. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY, Hg. *Aschen, Schlacken, Stäube. Aus Abfallverbrennung und Metallurgie*. Neuruppin: TK Thomé-Kozmiensky, S. 281-296. ISBN 978-3-935317-99-3.

DEPV, 2016. *Deponieverordnung Verordnung über Deponien und Langzeitlager, Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 4. März 2016 (BGBl. I S. 382) geändert worden ist. DepV*.

DIN 18121-1, 1976. *Bestimmung durch Ofentrocknung*. April 1976. Berlin: Beuth. Deutsche Norm. 18121-1.

DIN 18122-1, 1976. *Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze*. April 1976. Berlin: Beuth. Deutsche Norm. 18122-1.

DIN 18123, 1996. *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben. Bestimmung der Korngrößenverteilung*. November 1996. Berlin: Beuth. Deutsche Norm. 18123.

DIN 18196, 2011. *Erd- und Grundbau. Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke*. Mai 2011. Berlin: Beuth. Deutsche Normen. DIN 18196.

DIN EN 1097-2, 1998. *Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen*. Juni 1998. Berlin: Beuth. Deutsche Norm. DIN EN 1097-2.

DIN EN 1097-3, 1998. *Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 3: Bestimmung von Schüttdichte und Hohlraumgehalt*. Juni 1998. Berlin: Beuth. Deutsche Norm. DIN EN 1097-3.

DIN EN 1097-6, 2005. *Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme*. Dezember 2005. Berlin: Beuth. Deutsche Norm. DIN EN 1097-6.

DIN EN 1367-1, 2000. *Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen*. Januar 2000. Berlin: Beuth. Deutsche Norm. DIN EN 1367-1.

DIN EN 933-1, 2006. *Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren*. Januar 2006. Berlin: Beuth. Deutsche Norm. DIN EN 933-1.

DIN EN 933-3, 1997. *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen*. Februar 1997. Berlin: Beuth. Deutsche Norm. DIN EN 933,3.

DIN EN 933-4, 2015. *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen*. Januar 2015. Berlin: Beuth. Deutsche Norm. DIN EN 933-4.

DIN EN 933-5, 2005. *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen*. Februar 2005. Berlin: Beuth. Deutsche Norm. DIN EN 933-5.

DIN EN 933-6, 2002. *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen*. Februar 2002. Berlin: Beuth. Deutsche Norm. DIN EN 933-6.

DIN EN ISO 14040, 2012. *Umweltmanagement DIN EN ISO 14001 ff. Dokumentensammlung* [Online]. Stand der abgedruckten Normen: April 2012. Berlin: Beuth. Umweltschutz. ISBN 9783410218982. Verfügbar unter: <http://www.beuth.de/cmd?level=tpl-anganzeige&websource=vlb&smoid=142059198>

DIN EN ISO 14688-1, 2013. *Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden. DIN EN ISO 14688-1*. Berlin: Beuth.

DWA, 2002. *Umlagerung und Rückbau von deponierten Abfällen*. Hennef: GFA. ATV-DVWK-Arbeitsbericht. ISBN 3936514003.

DWA, 2012. *Rückbau von deponierten Abfällen*. Oktober 2012. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall. DWA-Themen. T 6/2012. ISBN 9783942964456.

ERDMANN, L., S. BEHRENDT und M. FEIL, 2011. *Kritische Rohstoffe für Deutschland. Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgung Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte* [Online]. Abschlussbericht. Berlin [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: <https://www.izt.de/fileadmin/downloads/pdf/54416.pdf>

EUWID, 2016a. Ablagerungsmenge steigt 2014 auf 10- Jahres- Hoch. 36/2016. In: *EUWID-Recycling & Entsorgung*, S. 14.

EUWID, 2016b. Studie: Rheinland Pfalz benötigt bis 2035 deutlich mehr Deponiekapazitäten. 26/2016. In: *EUWID-Recycling & Entsorgung*, S. 5; 23.

EY, 2016. *Weltweite Nachfrageentwicklung von Seltenen Erden nach ausgewählten Anwendungsgebieten im Zeitraum der Jahre 2010 bis 2015* [online]. 2016 [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/209224/umfrage/weltweite-nachfrageentwicklung-von-seltenen-erden-nach-anwendungsgebieten-bis-2015/>

FAULSTICH, M., S. VODEGEL, E. FEDIANINA, J. AIGNER, M. FRANKE, K. REH, P. DEGENER und P. HENSE, 2015. Neue Input-Stoffströme für Abfallverbrennungsanlagen bis 2025. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY und A. VERSTEYL, Hg. *Strategie, Planung, Umweltrecht*. Neuruppin: TK Verl. Karl Thome-Kozmiensky, S. 57-80. ISBN 978-3-935317-93-1.

Faustzahlen Biogas, 2007. Darmstadt: KTBL. ISBN 978-3-939371-46-5.

FEIL, M. und L. RÜTTINGER, 2011. *Rohstoffkonflikte nachhaltig vermeiden Risikoreiche Zukunftsrrohstoffe? Fallstudie und Szenarien zu China und seltene Erden. UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT FKZ 370819 102* [Online] [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4103.pdf>

FLAMME, S., 2002. *Energetische Verwertung von Sekundärbrennstoffen in industriellen Anlagen - Ableitung von Maßnahmen zur umweltverträglichen Verwertung* [Online]. Dissertation. Wuppertal [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: <http://d-nb.info/966236300/34>

FRANKE, M., M. MOCKER und I. LÖH, 2011. Landfill- Mining. Rohstoffpotentiale von Deponien. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY und D. GOLDMANN, Hg. *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin: TK-Verl., S. 403-418. ISBN 978-3-935317-67-2.

- FRICKE, K., C. HEUßNER, B. SCHULTE und S. WANKA, 2012. Landfill- Mining. Ein Beitrag der Abfallwirtschaft für die Ressourcensicherung. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY und D. GOLDMANN, Hg. *Recycling und Rohstoffe. Band 5*. Neuruppin: TK-Verl. ISBN 978-3-935317-81-8.
- FRICKE, K., K. MÜNNICH, S. WANKA, A. ZEINER, N. DICHTL, K. FÜLLING, T. SPENGLER, K. KIECKHÄFER und A. BREITENSTEIN, 2016a. *Schlußbericht- Verbundvorhaben TÖNLM. Entwicklung innovativer Verfahren zur Rückgewinnung ausgewählter Ressourcen aus Siedlungsabfall- und Schlackedeponien TP: 2 Ökonomische Bewertung, biologische und nasstechnische Aufbereitung FKZ033R090B*.
- FRICKE, K., P. HARBORTH, C. HEUßNER, J. REINHARDT, F. KNAPPE, T. SPENGLER, A. BREITENSTEIN, K. KIECKHÄHER, S. KRATZ und E. BLOEM, 2016b. *Phosphatrückgewinnung aus Deponien und Altablagerungen. Abschlussbericht*.
- FRIEDMANN, H. und F. ZOLLNER, 1995. Behandlung und Verwertung von Altmüll aus dem Deponierückbau. In: *Abfallwirtschafts-Journal. Vermeidung, Verwertung und Behandlung von Abfällen ; Fachzeitschrift für Vermeidung, Verwertung und Behandlung von Abfällen*. Wiesbaden: Vieweg, S. 76-81. ISBN 0934-6422.
- GÄTH, S. und J. NISPEL, 2011. Ressourcenpotential von ausgewählten Hausmülldeponien in Deutschland. *Müll und Abfall*, 43(2).
- GÄTH, S. und J. NISPEL, 2012. *Betrachtung des Ressourcenpotential der Kreismülldeponie Hechingen. Eine ressourcenorientierte, ökonomische, ökologische und technische Abschätzung* [Online]. Abschlußbericht. Gießen [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: http://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/207015/Abschlussbericht_Endversion.pdf?command=downloadContent&filename=Abschlussbericht_Endversion.pdf
- GÖSCHL, R., 1995. Rückbau der Deponie Burghof im Landkreis Ludwigsburg. In: *Abfallwirtschafts-Journal. Vermeidung, Verwertung und Behandlung von Abfällen ; Fachzeitschrift für Vermeidung, Verwertung und Behandlung von Abfällen*. Wiesbaden: Vieweg, S. 92-98. ISBN 0934-6422.
- GOSTEN, A., 2009. Untersuchungen über den Nutzen des Deponierückbaus. Gedanken zum Deponierückbau unter heutigen Rahmenbedingungen Beispiel einer BSR-Deponie. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY und D. GOLDMANN, Hg. *Recycling und Rohstoffe. Band 2*. Neuruppin: TK-Verl. ISBN 978-3-935317-40-5.
- HAEMING, H., 2016. Situation der Deponiebedarfsdeckung in Deutschland. Wie wirkt die MantelVO. *Müll und Abfall*, 48(10), 521-529.
- HANDBUCH ERSATZBAUSTOFFE, 2014. *Handbuch Ersatzbaustoffe. Grundlagen für den Einsatz im Straßen- und Erbau*.
- HAUPTMANN, S., 1998. *Starthilfe Chemie* [Online]. 2., durchgesehene Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. ISBN 9783519002314. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-87175-6>
- HEE, J., 2013. *Untersuchungen der Nutzungsmöglichkeiten von hochkalorischen Fraktionen aus Siedlungsabfalldeponien als Ersatzbrennstoff*. Bachelorarbeit. Aachen.
- HEIMHARD, H.-J., 1995. *Dekontamination durch Bodenwaschverfahren*. [Stand:] November 1994. Berlin: Ingenieurtechnischer Verband Altlasten. ITVA-Arbeitshilfe H1. 1.
- HERMANN, L. und K. SCHENK, 2009. *Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwasserreinigung* [Online]. Bern [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01517/index.html?lang=de&lang=de>

- HÖLZLE, I., 2010a. Energieeffizienz von Deponierückbauprojekten. *Müll und Abfall*, 42(10), 488-492.
- HÖLZLE, I., 2010b. Vom Deponierückbau bis zum landfill mining – eine Synthese internationaler Untersuchungen [online]. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 62(7-8), 155-161. ISSN 0945-358X. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00506-010-0200-7
- IVA, 2016. *Geschätzte weltweite Phosphatreserven in den Jahren 2005 und 2010 (in Milliarden Tonnen)* [online]. 10 August 2016, 12:00 [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/225234/umfrage/globale-phosphatreserven/>
- JONES, P.T., D. GEYSEN, Y. TIELEMANS, S. VAN PASSEL, Y. PONTIKES, B. BLANPAIN, M. QUAGHEBEUR und N. HOEKSTRA, 2013. Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery [online]. A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 55, 45-55. ISSN 0959-6526. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jclepro.2012.05.021
- JUNGMANN, A., 1997. Bauschuttauflbereitung mit Alljig- Setzmaschinen in Europa und USA. *AT Aufbereitungstechnik- Mineral Processing*, 38(10), 543-549.
- KAARTINEN, T., K. SORMUNEN und J. RINTALA, 2013. Case study on sampling, processing and characterization of landfilled municipal solid waste in the view of landfill mining [online]. *Journal of Cleaner Production*, 55, 56-66. ISSN 0959-6526. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jclepro.2013.02.036
- KACZALA, F., M.H. MEHDINEJAD, A. LÄÄNE, K. ORUPÖLD, A. BHATNAGAR, M. KRIIP-SALU und W. HOGLAND, 2015. Leaching characteristics of the fine fraction from an excavated landfill [online]. Physico-chemical characterization. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. ISSN 1438-4957 [Zugriff am: 11. August 2016]. Verfügbar unter: doi:10.1007/s10163-015-0418-3
- KERN, M., 2012. Stand und Perspektiven der Bioabfallvergärung in Deutschland. In: MÜLL-HANDBUCH, Hg. *Müllhandbuch. Sammlung und Transport, Behandlung und Ablagerung sowie Vermeidung und Verwertung von Abfällen*. Berlin: Schmidt. ISBN 978-3-503-09778-4.
- KIT, 2013. *Entwurf und Bau von Straßen* [online]. Teil: *Straßenbautechnik* [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: http://www.ise.kit.edu/EuB_SBT_2013.pdf
- KLEIN, T., 2010. Mineralische Sekundärbaustoffe im Straßenbau. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY und D. GOLDMANN, Hg. *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin: TK-Verl., S. 431-440. ISBN 978-3-935317-50-4.
- KNAPPE, F., 2011. Urban Mining. E sind neue Wege notwendig. *Müll und Abfall*, 43(10), 460-465.
- KNAPPE, F., 2014. Einsatz von Recycling- Baustoffen. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY, Hg. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle: Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen*. Neuruppin: TK, S. 457-464. ISBN 978-3-944310-11-4.
- KOSUB, P., 2015. Qualitäten und Einsatz von MVA- Schrotten in der Stahlerzeugung. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY, Hg. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle*. Band 2. Neuruppin: TK, S. 193-216. ISBN 9783944310213.
- KREUZWIESER, S. und T. DÖRRIE, 2003. Altlastensanierung durch Deponierückbau in Österreich. Darstellung der aktuellen Projekte Altlast "Wiener Neudorf" und "Fischer Deponie". In: G. MORSCHECK, Hg. *Betrieb, Stilllegung und Nachsorge von Deponien. Vorträge zum 6. Dialog "Abfallwirtschaft M-V", am Institut für Landschaftsbau und Abfallwirtschaft der Universität Rostock, Rostock, 03. Juli 2003*. Rostock: Inst. für Landschaftsbau und Abfallwirtschaft. ISBN 3860092537.

- KROOK, J., N. SVENSSON und M. EKLUND, 2012. Landfill mining: a critical review of two decades of research [online]. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 32(3), 513-520. ISSN 0956-053X. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.wasman.2011.10.015
- KRUG, S., 2008. *Ressourcenpotential von Deponien. Ressourcenpotential von Deponien- Gehalt an Stahlwerksrückständen der Deponie Eulingsberg*. Masterarbeit. Gießen.
- KRÜGER, M., B. BECKER und K. FRICKE, Hg., 2016. *Leitfaden zum Enhanced Landfill Mining. Bundesministerium für Bildung und Forschung r3- Strategische Metalle, Verbundvorhaben TÖNSLM* [Online]. FKZ033R090A [Zugriff am: 7. November 2016]. Verfügbar unter: <https://www.toensmeier.de/presse/meldungen/news/leitfaden-zum-enhanced-landfill-mining/013b3f189d6a41f8129609896086d767/>
- KRW- BAU, 2015. *Mineralische Bauabfälle Monitoring 2012* [Online]. Berlin [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: <http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/Bericht-9.pdf>
- KRWG, 2016. *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen, Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 27. September 1994 (BGBl. I S. 2705), die zuletzt durch Art. 4 G (BGBl. I S. 569, 584) vom 4. April 2016 geändert worden ist. KrWG*.
- KURKOWSKI, H. und U. PENZEL, 1997. Einfluß der Aufbereitungstechnologie auf die Eigenschaften des rezyklierten Zuschlags [Online]. In: *Darmstadter Massivbau-Seminar. Kreislaufgerechtes Bauen im Massivbau* [Zugriff am: 10. Februar 2016]. Verfügbar unter: http://www.b-i-m.de/public/AddFrame.asp?url_left=/Doku_Inhalt.htm&url_main=/Public/deutag_remex/damasemkurkowski.htm
- LAGA PN 98, 2002. *Länderarbeitsgemeinschaft Abfall Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen. LAGA PN 98*. Berlin: ESV. Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA). 32. ISBN 3503070370.
- LAGA, 2012. *Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen. Technische Regeln* [Online]. 5., erw. Aufl., Stand: 5. Juni 2012. Berlin: E. Schmidt. Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA). 20. ISBN 3503063951 [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: <http://www.laga-online.de/servlet/is/23874/>
- LECHTENBÖHMER, S., S. NANNING, B. HILLEBRAND und H.G. BUTTERMANN, 2006. *Einsatz von Sekundärbrennstoffen. UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT Forschungsbericht 204 42 203/02* [Online]. Dessau [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: http://www.eefa.de/pdf/UBA-Texte_07_06.pdf
- Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung ; [Bioenergie]*, 2013. 6., überarb. Aufl. Gülzow. biogas.fnr.de. ISBN 3-00-014333-5.
- LFU, 1993. *Handbuch Bodenwäsche*. Karlsruhe: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Handbuch Altlasten. 11.
- LUCKERT, K., Hg., 2004. *Handbuch der mechanischen Fest-Flüssig-Trennung*. Essen: Vulkan-Verl. ISBN 3-8027-2196-9.
- MAGIN, S., 1997. *Verfahrenstechnische Auslegung von Schwingsetzmaschinen*. Diplomarbeit.
- MALLON, T., 2005. *Bauchemie*. Würzburg: Vogel. Kamprath-Reihe. ISBN 9783834330079.
- MARTENS, H., 2011. *Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis* [Online]. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. ISBN 978-3-8274-2640-6. Verfügbar unter: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10422276>

- MASI, S., D. CANIANI, E. GRIECO, D.S. LIOI und I.M. MANCINI, 2014. Assessment of the possible reuse of MSW coming from landfill mining of old open dumpsites [online]. *Waste Management*, 34(3), 702-710. ISSN 0956053X. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.wasman.2013.12.013
- MAYER, F.W., Hg., 1950. *Der Entmischungsvorgang als physikalischer Aufbereitungsprozess*. 5. Auflage (11/12).
- MEYER, N. und A. EMERSLEBEN, 2010. Einsatzmöglichkeiten von recyceltem Altglas im Verkehrswegebau. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY und D. GOLDMANN, Hg. *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin: TK-Verl., S. 441-450. ISBN 978-3-935317-50-4.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND FORSTEN, 1996. *Anwenderhandbuch: Grabarbeiten an bestehenden Deponien und Altablagerungen*. Trier.
- MOCKER, M., K. FRICKE, I. LÖH, M. FRANKE, T. BAHR, K. MÜNNICH und M. FAULSTICH, 2009a. Urban Mining- Rohstoffe der Zukunft. *Müll und Abfall*, 2009(10), 492-501.
- MOCKER, M., M. FRANKE, F. STENZEL und M. FAULSTICH, 2009b. Von der Abfallwirtschaft zur Ressourcenwirtschaft. In: S. FLAMME, Hg. *11. Münsteraner Abfallwirtschaftstage. [Termin: 10.02. - 11.02.2009, Ort: Halle Münsterland, Münster]*. Münster: LASU, S. 27-33. ISBN 9783981114218.
- MÖNKARE, T.J., M.R.T. PALMROTH und J.A. RINTALA, 2016. Characterization of fine fraction mined from two Finnish landfills [online]. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 47(Pt A), 34-39. ISSN 0956-053X. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.wasman.2015.02.034
- MÜLLER, A. und L. WIENKE, 2004. Untersuchungen zur Optiierung der Setzmaschinentchnik. *Ratgeber Abbruch & Recycling*, 45-50.
- MÜLLER, A., T. SCHNELLEERT und K. KEHR, 2010. Gip im Griff. *AT Aufbereitungstechnik-Mineral Processing*, 51(6), 34-43.
- MÜNNICH, K., S. WANKA und K. FRICKE, 2015. Neue Deponiekapazitäten durch Deponierückbau? In: K. WIEMER, M. KERN und T. RAUSSEN, Hg. *Bio- und Sekundärrohstoffverwertung. Stofflich, energetisch*. Witzzenhausen: Witzzenhausen-Institut f. Abfall Umwelt u. Energie, S. 449-461. ISBN 3-928673-70-X.
- NEROTH, G. und D. VOLLENSCHAAR, 2011. *Wendehorst Baustoffkunde. Grundlagen - Baustoffe - Oberflächenschutz ; mit 363 Tabellen* [Online]. 27., vollständig überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden. ISBN 978-3-8351-0225-5. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9919-4>
- NOLTE, N. und K. KELDENICH, 2015. Alternative Brennstoffe im Verbund mit Kohlekraftwerken. Zukünftiger Einsatz von Ersatzbrennstoffen aus Sicht der Kraftwerkstechnik. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY und M. BECKMANN, Hg. *Energie aus Abfall*. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, S. 587-604. ISBN 978-3-944310-18-3.
- OERTER, M., 2008. Entwicklungen für den Sekundärbrennstoffeinsatz in der Zementindustrie. In: B. BILITEWSKI, Hg. *Thermische Abfallbehandlung. 13. Fachtagung, [Band 13 ; 11. bis 12. März 2008 in München]*. Kassel: Univ. Press, S. 95-100. ISBN 978-3-89958-384-7.
- ONKELBACH, A. und J. SCHULZ, 2014. Ersatzbaustoffe. Grundlagen für den Einsatz von RC-Baustoffen und HMV- Aschen im Straßen- und Erdbau. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY, Hg. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle: Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen*. Neuruppin: TK, S. 243-260. ISBN 978-3-944310-11-4.

- ONKELBACH, A., 2015. Mineralische Ersatzbaustoffe - Herausforderung der Wiederverwertung und Strategien zur Verbesserung der Marktsituation. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY, Hg. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle*. Band 2. Neuruppin: TK, S. 305-320. ISBN 9783944310213.
- OSCHLIES, D., 1989. Entwicklungstendenzen bei der Sammlung von Haushaltsabfällen. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY, Hg. *Sammlung, Umschlag, Transport von Abfällen*. Berlin: EF-Verl. für Energie- und Umweltschutz, S. 139-148. ISBN 978-3924511326.
- PATZOLD, V., G. GRUHN und C. DREBENSTEDT, 2008. *Der Nassabbau. Erkundung, Gewinnung, Aufbereitung, Bewertung* [Online]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-49692-2. Verfügbar unter: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10223248>
- POLLMANN, J., 2008. Setzmaschinen in der Rohstoff- und Recyclingindustrie [online]. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 153(6), 225-229. ISSN 0005-8912. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00501-008-0380-7
- PRECHTHAI, T., M. PADMASRI und C. VISVANATHAN, 2008. Quality assessment of mined MSW from an open dumpsite for recycling potential [online]. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1-2), 70-78. ISSN 09213449. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.resconrec.2008.09.002
- PRETZ, T. und A. GARTH, 2012. Sortierung von abgelagerten Abfällen. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY und D. GOLDMANN, Hg. *Recycling und Rohstoffe. Band 5*. Neuruppin: TK-Verl., S. 945-957. ISBN 978-3-935317-81-8.
- QUAGHEBEUR, M., B. LAENEN, D. GEYSEN, P. NIELSEN, Y. PONTIKES, T. VAN GERVEN und J. SPOOREN, 2013. Characterization of landfilled materials [online]. Screening of the enhanced landfill mining potential. *Journal of Cleaner Production*, 55, 72-83. ISSN 0959-6526. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jclepro.2012.06.012
- RAL-GZ 724, 2012. *Gütesicherung RAL GZ 724. Gütesicherung Sekundärbrennstoffe*. Ausg. Juni 2001. Berlin: Beuth. RAL-GZ. 724.
- RETTENBERGER, G., 2009. Zukünftige Nutzung der Deponie als Ressourcenquelle. In: S. FLAMME, Hg. *11. Münsteraner Abfallwirtschaftstage. [Termin: 10.02. - 11.02.2009, Ort: Halle Münsterland, Münster]*. Münster: LASU. ISBN 9783981114218.
- RETTENBERGER, G., 2012. Rohstoffpotential in Deponien. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY und D. GOLDMANN, Hg. *Recycling und Rohstoffe. Band 5*. Neuruppin: TK-Verl., S. 919-932. ISBN 978-3-935317-81-8.
- RETTENBERGER, G., S. FRIEDRICH und M. CHRIST, 2011. Untersuchungen zum Wertstoffpotential in Abfällen von rückgebauten Hausmülldeponien. *Müll und Abfall*, 43(10), 466-469.
- RODRIGUES, F., M.T. CARVALHO, L. EVANGELISTA und J. de BRITO, 2013. Physical-chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants [online]. *Journal of Cleaner Production*, 52, 438-445. ISSN 0959-6526. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jclepro.2013.02.023
- ROMMEL, W. und S. KREIBE, 2015. Rohstoffversorgung und Recycling – Bedeutung und Effektivität am Beispiel von Metallen. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY, Hg. *Recycling und Rohstoffe. Band 8*. Neuruppin: TK-Verl., S. 345-362. ISBN 978-3-944310-20-6.
- RÖTH, D., 2015. Einsatzpotentiale von mineralischen Baustoffen in Theorie und Praxis. *Müll und Abfall*, 47(10), 559-563.

ROTHEUT, M. und P. QUICKER, 2015. Thermisches Recycling beim Landfill Mining. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY und M. BECKMANN, Hg. *Energie aus Abfall*. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, S. 567-587. ISBN 978-3-944310-18-3.

SARC, R., R. POMMBERGER und E. LORBER, 2015. Perspektiven der Verwertung von Ersatzbrennstoffen in Zementwerken. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY und A. VERSTEYL, Hg. *Strategie, Planung, Umweltrecht*. Neuruppin: TK Verl. Karl Thome-Kozmiensky, S. 139-164. ISBN 978-3-935317-93-1.

SCHEELHAASE, T., C. SEMISCH und M. BRAUNGART, Hg., 2008. *Zukunft verbrennen? Von der Abfallverbrennung hin zur Wertstoffschöpfung nach Cradle to Cradle ; Auswirkungen von "Ersatzbrennstoff-Verbrennungsanlagen" auf die Entwicklung biologischer und technischer Nährstoffkreisläufe*. Hamburg: EPEA Internationale Umweltforschung.

SCHEFFER, F. und P. SCHACHTSCHABEL, 1976. *Lehrbuch der Bodenkunde*. 9. Aufl. Stuttgart: Enke. ISBN 3432847793.

SCHEFFOLD, K., 2011. Umlagerung und Rückbau von Deponien. Sammlung und Transport, Behandlung und Ablagerung sowie Vermeidung und Verwertung von Abfällen. *Müll-Handbuch*, (7102).

SCHMIDMEYER, S., 2014. Markt für mineralische Recycling- Baustoffe. Erfahrungen aus Sicht der Praxis. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY, Hg. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle: Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen*. Neuruppin: TK, S. 105-116. ISBN 978-3-944310-11-4.

SCHUBERT, H., 1996. *Sortierprozesse. Dichtesortierung, Sortierung in Magnetfeldern, Sortierung in elektrischen Feldern, Flotation, Klauen, Sortierung nach mechanischen und nach thermischen Eigenschaften ; 56 Tabellen*. 4., völlig neu bearb. Aufl. Stuttgart: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie. Aufbereitung fester Stoffe. / von Heinrich Schubert ; Bd. 2. ISBN 3-342-00555-6.

SCHUBERT, H., 2008. *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik*. Hoboken: John Wiley & Sons. Band 2. ISBN 978-3-527-30577-3.

SPELLMANN, P., D. RANNER und M. REISNER, 1993. Low-emission waste transposition by converting from anaerobic to aerobic decomposition. In: H.J.P. EIJSSACKERS und T. HAMERS, Hg. *Integrated Soil and Sediment Research: A Basis for Proper Protection*. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 637-640. ISBN 978-94-010-4887-3.

STATISTA, 2016a. *Basismetalle - Statista-Dossier* [online] [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/studie/id/6772/dokument/basismetalle-statista-dossier/>

STATISTA, 2016b. *Seltene Erden - Statista-Dossier* [online] [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/studie/id/6596/dokument/seltene-erden-statista-dossier/>

STOLL, M., 2014. Recycling von mineralischen Abfällen. Aktueller Stand und Ausblick aus Sicht der Wirtschaft. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY, Hg. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle: Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen*. Neuruppin: TK, S. 11-28. ISBN 978-3-944310-11-4.

STRANGE, K., 2010. *Landfill Mining* [online]. *Preserving Resources through Integrated Sustainable Management of Waste* [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: <http://www.enviroalternatives.com/landfill.html>

SZ, 2016. *Selbstversorgungs- und Importanteil am Bedarf ausgewählter Rohstoffe in Deutschland im Jahr 2012* [online]. 10 August 2016, 12:00 [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/239941/umfrage/selbstversorgungs-und-importanteil-am-bedarf-ausgewaehlter-rohstoffe-in-deutschland/>

TAGGART, A.F., 1951. *Elements of ore dressing*. New York, NY: Wiley; Chapman & Hall.

THIEL, S., 2011. Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen in Kohlekraftwerken. Anlagen und Projekte, EBS-Mengen und -Qualitäten, Betriebserfahrungen, Trends und Prognosen. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY und M. BECKMANN, Hg. *Biomasse und Biogas, Ersatzbrennstoffe, Windenergie*. Neuruppin: TK Verl. Karl Thomé-Kozmiensky. ISBN 978-3-935317-65-8.

THIEL, S., 2013. Ersatzbrennstoff- Kraftwerke in Deutschland und Österreich. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY und M. BECKMANN, Hg. *Energie aus Abfall*. Neuruppin: TK-Verl., S. 837-854. ISBN 978-3-935317-92-4.

TL-ASPHALT-STB 07/13, 2013. *Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen. TL Asphalt-StB 07/13*. Ausg. 2007, Fassung 2013. Köln: FGSV-Verl. FGSV R1, Regelwerk. 797. ISBN 978-3-939715-69-6.

TL-BETON-STB 07, 2008. *Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. TL Beton-StB 07*. Ausg. 2007. Köln: FGSV-Verl. FGSV R1, Regelwerk. 891. ISBN 978-3-939715-59-7.

TL-BUB E-STB 09, 2009. *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus. TL BuB E-StB 09*. Ausg. 2009. Köln: FGSV-Verl. FGSV R1, Regelwerke. 597. ISBN 9783939715887.

TL-GESTEIN-STB 04, 2007. *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau*. Ausg. 2004, Fassung 2007. Köln: FGSV-Verl.

TL-SOB- STB, 2007. *Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau. TL SoB-StB 04*. Ausg. 2004, Fassung 2007. Köln: FGSV. FGSV. 697 : R1. ISBN 9783939715399.

TRINKWV, 2016. *Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch. Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. März 2016 (BGBl. I S. 459), die durch Artikel 4 Absatz 21 des Gesetzes vom 18. Juli 2016 (BGBl. I S. 1666) geändert worden ist. TrinkwV*.

ULMANS, L., 2011. Landfill Mining. A multi- actor approach on policy preparatopm. In: ENVIRONMENTAL SANITARY ENGINEERING CENTRE, Hg. *13 th International Waste Management and Landfill Symposium*.

UMWELTBUNDESAMT, 2012. *Optimierung des Rückbaus/Abbaus von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC -Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär - und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung. UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT FKZ 3709 33 317* [Online]. Dessau-Roßlau [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4430.pdf>

UMWELTBUNDESAMT, 2015. *Schonung von Phosphor- Ressourcen aus Sicht einer nachhaltigen Bodennutzung und des Bodenschutzes* [Online] [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/schonung_von_phosphor-ressourcen_aus_sicht_einer_nachhaltigen_bodennutzung_und_des_bodenschutzes.pdf

- VAN DER ZEE, D. J., M.C. ACHTERKAMP und B.J. de VISSER, 2004. Assessing the market opportunities of landfill mining [online]. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 24(8), 795-804. ISSN 0956-053X. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.wasman.2004.05.004
- VAN VOSSSEN, W.J. und O.J. PRENT, 2011. Feasibility study - sustainable material and energy recovery from landfills in europe. In: ENVIRONMENTAL SANITARY ENGINEERING CENTRE, Hg. *13 th International Waste Management and Landfill Symposium*.
- VDZ, 2015. *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie* [online] [Zugriff am: 10. August 2016]. Verfügbar unter: https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Umweltdaten/VDZ_Umweltdaten_2014_DE_EN.pdf
- VERPACKV, 2013. *Verordnung über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen (Verpackungsverordnung - VerpackV)*. Paderborn: Salzwasser Verlag. ISBN 9783955213800.
- WANKA, S., K. MÜNNICH, A. ZEINER und K. FRICKE, 2016. Landfill Mining. Nassmechanische Aufbereitung von Feinmaterial. *Müll und Abfall*, 48(1), 21-28.
- WEI-HONG, X., C. HENDRIKS, A. FRAAIJ und P. REM, 2004. Quality improvement of granular wastes—The effective way to recycle secondary raw building materials [online]. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 19(4), 87-90. ISSN 1000-2413. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF02841378
- WEIMANN, K., 2009. *Untersuchungen zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand unter Verwendung der Setzmaschinenteknik* [Online]. Bauhaus-Univ., Fak. Bauingenieurwesen., Diss.--Weimar, 2008. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). BAM-Dissertationsreihe. 51. ISBN 9783981291070. Verfügbar unter: http://www.bam.de/de/service/publikationen/publikationen_medien/dissertationen/diss_51_vt.pdf
- WIEMER, K., B. BARTSCH und H. SCHMEISKY, 2009. Deponien als Rohstofflagerstätten von morgen. Ergebnisse einer hessenweiten Untersuchung. In: K. WIEMER und M. KERN, Hg. *Bio- und Sekundärrohstoffverwertung. Stofflich, energetisch*. Witzenhausen: Witzenhausen-Inst. für Abfall Umwelt und Energie, S. 685-716. ISBN 3928673548.
- WOTRUBA, H. und L. WEITKÄMPER, 2009. Neue Möglichkeiten der trockenen Dichtesortierung. In: K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY und D. GOLDMANN, Hg. *Recycling und Rohstoffe. Band 2*. Neuruppin: TK-Verl., S. 389-400. ISBN 978-3-935317-40-5.
- ZHOU, C., W. FANG, W. XU, A. CAO und R. WANG, 2014. Characteristics and the recovery potential of plastic wastes obtained from landfill mining [online]. *Journal of Cleaner Production*, 80, 80-86. ISSN 0959-6526. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jclepro.2014.05.083

8 Anhang

Grundlagen

Anlage 8-1: Wesentliche Eigenschaften heizwertreicher Fraktionen

Chemische Eigenschaften	Die chemischen Eigenschaften definieren zunächst den Anteil nicht brennbarer Bestandteile in Form des Wasser- und Aschegehaltes sowie den Gehalt an Kohlenstoff, flüchtigen Bestandteilen sowie Spurenstoffen. Unter Spurenstoffen werden Stoffe wie beispielsweise Schwermetalle sowie Chlor, Phosphor, Schwefel und Stickstoff zusammengefasst, welche in Bezug auf die Schadstoffemissionen und den Kraftwerksbetrieb, z.B. in Form von Korrosion oder Verschmutzung, eine Rolle spielen. Im Bereich der Zementerzeugung können die Spurenstoffe außerdem die Produktqualität des Klinkers beeinflussen (Beckmann und Horeni, 2002; Krüger et al., 2016; Thiel, 2011; Oerter, 2008).
Mechanische Eigenschaften	Die mechanischen Eigenschaften der Brennstoffe werden durch die Dichte und die Schütteeigenschaften sowie die Mahlbarkeit, Korngrößenverteilung und Lagerfähigkeit bestimmt (Beckmann und Horeni, 2002; Krüger et al., 2016).
Kalorische Eigenschaften	Die kalorischen Eigenschaften geben Auskunft über den Energiegehalt des Brennstoffs in Form des Heiz- oder Brennwertes. Weitere kalorische Eigenschaften stellen beispielsweise die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit sowie die spezifische Mindestabgasmenge dar (Beckmann und Horeni, 2002).
Reaktionstechnische Eigenschaften	Von besonderer Relevanz sind bei dem Einsatz von Ersatzbrennstoffen die reaktionstechnischen Eigenschaften. Das Zünd- und Ausbrandverhalten des Brennstoffes wird vorrangig durch den Anteil flüchtiger Bestandteile, der Wärmeleitfähigkeit sowie der Geometrie des Brennstoffes bestimmt und ist von mehreren Reaktionsbedingungen abhängig. Gleiches gilt beispielsweise auch für das korrosive Verhalten von Chlor, welches nicht allein durch den Chlorgehalt, sondern das Zusammenwirken der mechanischen, chemischen und kalorischen Eigenschaften bestimmt wird (Beckmann und Horeni, 2002).

Anlage 8-2: Schwermetallgehalte für gütegesicherte Brennstoffe nach RAL-GZ 724

Parameter	Einheit	Schwermetallgehalte	
		Medianwert	„80 % Perzentil“ Wert
Cadmium	mg/ MJ TS	0,25	0,56
Quecksilber		0,038	0,075
Thallium		0,063	0,13
Arsen		0,31	0,81
Kobalt		0,38	0,75
Nickel		5,0	10
Antimon		3,1	7,5
Blei		12	25
Chrom		7,8	16
Mangan		16	31
Vanadium		0,63	1,6
Zinn		1,9	4,4

Anlage 8-3: Zuordnungswerte, Einbauklassen und Einbaukriterien (LAGA, 2012), zitiert bei (Handbuch Ersatzbaustoffe, 2014)

Zuordnungswert	Einbauklasse	Vorgeschriebene Maßnahmen
Z0	Uneingeschränkter Einbau	<ul style="list-style-type: none"> - Aus Vorsorgegründen kein Einbau in festgesetzten oder geplanten Trinkwasser- und Heilquellenschutzgebieten (Zone 1 und II) - Zusätzliche Anforderungen an bestimmte Anwendungsbereiche wie Kinderspielflächen und Sportanlagen sind zu beachten
Z1 Z1.1 Z1.2	Eingeschränkter offener Einbau	<ul style="list-style-type: none"> - Kein Einbau in Trinkwasserschutzgebieten (Zonen WSG I – IIIA) und Heilquellenschutzgebieten (Zonen I – II)³⁾ - Kein Einbau in Überschwemmungsgebieten - Kein Einsatz in Wasservorranggebieten ¹⁾ - Bei der Verwertung bis zur Obergrenze 1.2 ist ein zusätzlicher Erosionsschutz notwendig - Mindestabstand zwischen Schüttkörperbasis und höchstem zu erwartenden Grundwasserstand: 1 m bis zur Klasse Z1.1 und 2 m bis zur Klasse Z1.2 - Kein Einbau in Naturschutzgebieten und Biosphärenreservaten²⁾ - Keine Anwendung bei sensibler Nutzung wie Klein- und Hausgärten, Spielplätze, Schulhöfe, landwirtschaftlich genutzte Flächen etc.
Z2	Eingeschränkter Einbau mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> - Einsatz bevorzugt in hydrologisch günstigen Gebieten (d.h., bei denen der Grundwasserleiter nach oben durch ausreichend mächtige Deckschicht mit hohem Rückhaltevermögen gegenüber Schadstoffen überdeckt ist, wie z.B. durch 2 m dicke Deckschichten aus Ton, Schluff oder Lehm) - Einbau bei Großmaßnahmen bevorzugt - Mindestabstand zwischen Schüttkörperbasis und höchstem zu erwartendem Grundwasserstand: 1 m - Kein Einbau in Trinkwasserschutzgebieten (Zone I – IIIB), Heilquellenschutzgebieten (Zone I – IV) und Wasservorranggebieten ⁴⁾ - Kein Einbau in Überschwemmungsgebieten - Kein Einbau in Karstgebieten ohne ausreichende Deckschicht - Keine Anwendung bei sensibler Nutzung wie Klein- oder Hausgärten, Spielplätze, Schulhöfe, landwirtschaftlich genutzte Flächen etc. - Kein Einbau als Dränschicht oder als Verfüllung von Leitungsgräben
¹⁾ Diese Einschränkung gilt für Steinkohlen- Grobasche/ -Kesselschlacke und Steinkohlen- Rostasche ²⁾ Diese Einschränkung gilt für Kupolofenschlacke und Elektroofenschlacke ³⁾ Mit Überarbeitung des Allgemeinen Teils von 2003 ist prinzipiell auch eine Verwertung in WSG IIIQ / HSG III möglich ⁴⁾ Mit Überarbeitung des Allgemeinen Teils von 2003 ist prinzipiell auch eine Verwertung in WSG IIIA / HSG III und WSG IIIB / HSG IV in wasserundurchlässigen Bauweisen des Straßenbaus möglich		

Anlage 8-4: Eigenschaften von Recyclingbaustoffen für Anwendungen als Schichten ohne Bindemittel (Teil I)

Stoffliche Kennzeichnung	Bei Recyclingbaustoffen ist die stoffliche Zusammensetzung, bis zum Vorliegen einer DIN EN gemäß DIN EN „Merkblatt über die Wiederverwertung von mineralischen Baustoffen als Recycling- Baustoffe im Straßenbau“ (M RC) zu ermitteln und anzugeben, weiterhin ist die stoffliche Zusammensetzung gemäß Anhang B, Tabelle 1. B, TL-Gestein-StB 04 (2007) einzuhalten.
Rohdichte	Die Rohdichte der Gesteinskörnung ist gemäß DIN EN 1097-6 (2005), Anhang A zu ermitteln und anzugeben. Die Rohdichte ist definiert als der Quotient aus seiner Masse und seinem Volumen, inklusive der Eigen- und Kornporen (Handbuch Ersatzbaustoffe, 2014). Soweit gefordert, ist die Schüttdichte nach DIN EN 1097-3 (1998) zu bestimmen und anzugeben. Diese ist definiert als Quotient der Stoffmasse und Schüttvolumen inklusive Kornzwischenraum und Kornporen (Handbuch Ersatzbaustoffe, 2014)
Korngruppe/ Lieferkörnung	Für Gesteinskörnungen müssen für die weitere Verwendung Lieferkörnungen gemäß der Tabelle 1, TL-Gestein-StB 04 (2007) angegeben werden. Lieferkörnungen werden im Straßenbau als abgestufte Korngemische benötigt, um eine hohe Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit zu gewährleisten. Die Lieferkörnung wird über die Angabe des oberen (D) und unteren (d) Siebkorndurchmessers definiert, wobei ein definierter Anteil an Überkorn (>D) beziehungsweise Unterkorn (<d) erlaubt ist (TL-Gestein-StB 04, 2007; Handbuch Ersatzbaustoffe, 2014).
Korngrößenverteilung	Die Korngrößenverteilung von Baustoffgemischen bestimmt wesentlich die Eigenschaften von Schichten ohne Bindemitteln, z.B. hinsichtlich der Tragfähigkeit oder Frostsicherheit. Die Korngrößenverteilung wird nach DIN EN 933-1 (2006) bestimmt und dient der weiteren Kategorisierung der Gesteinskörnung gemäß Tabelle 2, TL-Gestein, indem der Anteil an Über- und Unterkorn ermittelt wird (KIT, 2013).
Zusammengefasste Korngruppe	Die Kombination mehrerer benachbarter Lieferkörnungen ist möglich, es gelten dabei die Anforderungen an den Über- beziehungsweise Unterkornanteil gemäß der Tabelle 3, TL-Gestein (TL-Gestein-StB 04, 2007).
Gehalt an Feinanteilen	Als Feinanteil wird gemäß TL-Gestein die Kornklasse bezeichnet, die das Sieb mit einer Maschenweite von 0,063 mm passiert. Diese Feinanteile können aus schluffigen oder tonigen Bestandteilen bestehen. Der Anteil der Feinanteile ist anzugeben, da diese beispielsweise die Plastizität und die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung beeinflussen (Neroth und Vollenschaar, 2011). Anforderungen an die zulässigen Gehalte an Feinanteilen, in Abhängigkeit der Lieferkörnung, sind in der TL-Gestein, Tabelle 5 aufgelistet. Für die Anwendung der Gesteinskörnung im Bereich Schichten ohne Bindemittel ist eine Prüfung der Qualität der Feinanteile gemäß Tabelle 6, TL-Gestein nicht erforderlich.

Anlage 8-4: Eigenschaften von Recyclingbaustoffen für Anwendungen als Schichten ohne Bindemittel
(Teil II)

Kornform grober Gesteinskörnungen	Im Gegensatz zu gedrunenen Körnern behindern platte Körner den Verdichtungsvorgang. Platte Körner sind weiterhin anfälliger gegen Zerbrechen, da sie im Gegensatz zu gedrunenen Körnern schlechter in das umgebende Material eingebettet sind. Die Kornform der Gesteinskörnung wird als Kornformkennzahl SI (DIN EN 933-4, 2015) oder als Plattigkeitskennzahl FI (DIN EN 933-3, 1997) bestimmt. Die Kornformkennzahl SI ergibt sich dabei aus dem Massenanteil ungünstig geformter Körner, deren Verhältnis von Länge zu Dicke größer als 3:1 ist. Die Plattigkeitskennzahl ergibt sich aus dem Anteil ungünstig geformter Körner die mittels Schlitzsieben abgesiebt wurden. Gemäß Tabelle 7 beziehungsweise Tabelle 8, TL-Gestein, erfolgt in Abhängigkeit des Anteiles ungünstig geformter Körner eine Kategorisierung der Gesteinskörnung, wobei die Kornform gemäß TL-Gestein nur für grobe Gesteinskörnungen zu bestimmen ist (KIT, 2013; Handbuch Ersatzbaustoffe, 2014; TL-Gestein-StB 04, 2007).
Anteil gebrochener Oberflächen	Mit steigendem Anteil der gebrochenen Oberflächen innerhalb einer Gesteinskörnung nimmt die Verzahnung innerhalb der Gesteinskörnung zu und damit die innere Reibung beziehungsweise das Lastaufnahmevermögen. Die Bestimmung des Anteiles der gebrochenen Oberflächen erfolgt nach DIN EN 933-5 (2005). Über die visuell bestimmten Massenanteile an gebrochenen Körnern, vollständig gebrochenen Körnern und vollständig runder Körner kann eine Kategorisierung der Gesteinskörnung hinsichtlich dem Anteil gebrochener Oberflächen nach Tabelle 9, TL-Gestein erfolgen. Der Anteil gebrochener Oberflächen ist gemäß TL-Gestein nur für grobe Gesteinskörnungen zu bestimmen (TL-Gestein-StB 04, 2007; KIT, 2013).
Fließkoeffizient	Der Fließkoeffizient ist für die Gesteinskörnungen 0/2 mm sowie $d = 0$ und $D \geq 8$ mm gemäß DIN EN 933-6 (2002) zu bestimmen. Der Fließkoeffizient ist ein Maß für die versteifende Wirkung der Gesteinskörnung und für Anwendungen im Bereich Asphalt von Relevanz. Als Fließkoeffizient ist die Zeit in Sekunden definiert, welche ein festes Volumen einer Gesteinskörnung benötigt, um unter festgelegten Bedingungen durch eine definierte Öffnung zu fließen. (TL-Gestein-StB 04, 2007; KIT, 2013).
Widerstand gegen Zertrümmerung	Straßen sind mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt, weshalb die Gesteinskörnungen widerstandsfähig gegenüber Zertrümmerung sein müssen. Der Widerstand gegenüber Zertrümmerung wird als Schlagzertrümmerungswert SZ nach Abschnitt 6 (DIN EN 1097-2, 1998) oder als Los Angeles-Koeffizient LA nach Abschnitt 2 (DIN EN 1097-2, 1998) bestimmt. In den Analyseverfahren wird die Gesteinsprobe mechanisch beansprucht, wobei diese eine Zerkleinerung erfährt. Mittels Siebung wird anschließend der Zertrümmerungsgrad bestimmt und eine Kategorisierung der Gesteinskörnung hinsichtlich des Widerstandes gegen Zertrümmerung kann anhand Tabelle 12 beziehungsweise Tabelle 13 gemäß TL-Gestein erfolgen. Der Widerstand gegen Zertrümmerung ist nur für grobe Gesteinskörnungen durchzuführen (TL-Gestein-StB 04, 2007; KIT, 2013).

Anlage 8-4: Eigenschaften von Recyclingbaustoffen für Anwendungen als Schichten ohne Bindemittel
(Teil III)

Wasseraufnahme	Die TL-Gesteine fordern im Bereich Straßenbau den Einsatz witterungsbeständiger Gesteinskörnungen. Anhand der Wasseraufnahme wird der Widerstand gegenüber Frostbeanspruchungen bestimmt, die Prüfung der Wasseraufnahme erfolgt gemäß (DIN EN 1097-6, 2005). Weist die Gesteinskörnung eine Wasseraufnahme von weniger als 0,5 % auf, wird dieser ein ausreichender Frostwiderstand zugeschrieben. Eine Kategorisierung hinsichtlich der Wasseraufnahme erfolgt in der Tabelle 18, TL-Gesteine. Für Hochofenschlacken sowie poröse Gesteinskörnungen ist dieses Verfahren nicht geeignet (Handbuch Ersatzbaustoffe, 2014; TL-Gestein-StB 04, 2007).
Widerstand gegenüber Frostbeanspruchung	Halten die Gesteinskörnungen die Anforderungen hinsichtlich der Wasseraufnahme nicht ein, ist gemäß TL-Gestein der Widerstand gegenüber Frostbeanspruchung nach DIN EN 1367-1 (2000) zu ermitteln. Die Gesteinsproben werden dabei im wassergetränktem Zustand zehn Frost-Tau-Wechseln unterzogen und anschließend hinsichtlich Rissbildung und Absplitterung untersucht. Der Anteil der abgesplitterten Bestandteile wird über eine Siebanalyse bestimmt. Eine Kategorisierung der Gesteinskörnung hinsichtlich der Widerstandsfähigkeit gegenüber Frostbeanspruchung erfolgt anhand der Tabelle 19, TL-Gestein (Handbuch Ersatzbaustoffe, 2014; TL-Gestein-StB 04, 2007).
Plastizität	Die Plastizität, bestimmt nach DIN 18122-1 (1976), dient Feststellung der Zustandsgrenzen bindiger Böden zwischen Sprödigkeit und Elastizität und ist ein Maß für das Wasserbindungsvermögen.

Anlage 8-5: Anforderung an die Korngrößenverteilung grobkörniger Böden nach DIN 18196 ⁵(TL- BuB E-StB 09, Tabelle 1, verändert)

Grobkörnige Böden	Korngrößen- Massenanteil [%]			Bodengruppen und Kurzzeichen
	d ≤ 0,063 mm	d ≤ 2 mm	d > 63 mm	
Kieskorn (Grant)	≤ 5	≤ 60	≤ 5	GE, GW, GI
Sandkorn		> 60		SE, SW, SI

Kurzzeichen gemäß DIN 18196

G = Kieskorn

S = Sandkorn

E = Eng gestuft

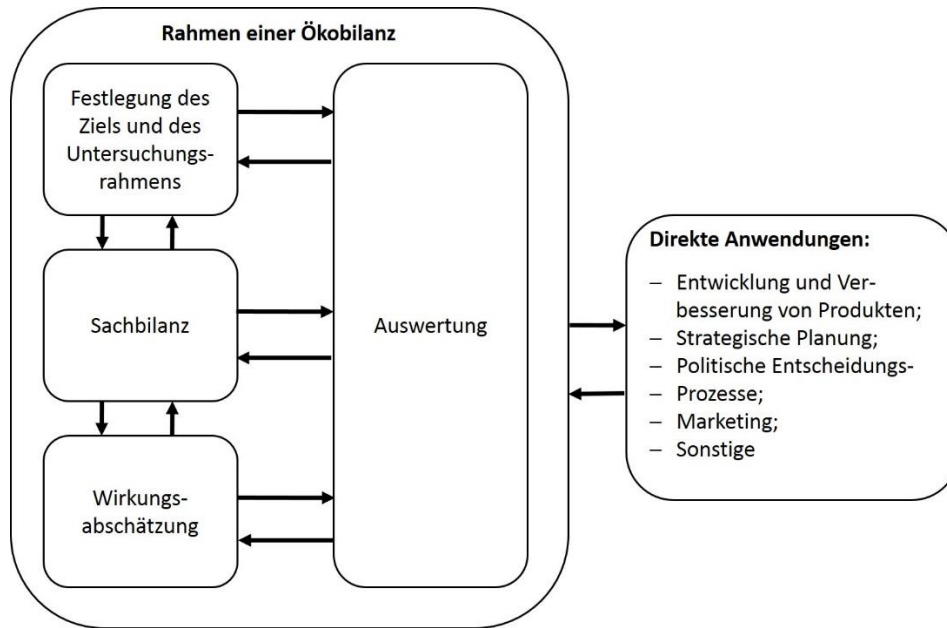
W = Weit gestuft

I = intermittierend gestuft

Anlage 8-6: Anforderung an die Korngrößenverteilung gemischter Böden nach DIN 18196 (TL- BuB E-StB 09, Tabelle 2)

Gemischt-körnige Böden	Korngrößen- Massenanteil [%]			Bodengruppe und Kurzzeichen
	$d \leq 0,063 \text{ mm}$	$d \leq 2 \text{ mm}$	$d > 63 \text{ mm}$	
Böden mit geringem Massenanteil a an Feinkorn	$5 < a \leq 15$	≤ 60	≤ 5	GU, GT
		> 60		SU, ST
Böden mit hohem Massenanteil a an Feinkorn	$15 < a \leq 40$	≤ 60		GU*,GT*
		> 60		SU*, ST*
T = Tonig U = Schluffig				

⁵ „Wiedergegeben mit Erlaubnis des DIN- Deutsches Institut für Normung e.V. Maßgebend für das Anwenden der DIN- Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist“



Anlage 8-7: Bestandteile einer Ökobilanz⁶ [DIN EN ISO 14040, 2009]

⁶ „Wiedergegeben mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Maßgebend für das Anwenden der DIN-Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.“

Material und Methoden

Anlage 8-8: Analysemethoden für Feststoffparameter (Teil I)

Parameter	Einheit	BG	Methode Einstufung
Acenaphthylen	mg/kg TS	0,05	DIN EN 15527 / DIN ISO 18287
Anthracen	mg/kg TS	0,05	DIN EN 15527 / DIN ISO 18287
Antimon	mg/kg TS	1	DIN EN ISO 17294-2
Arsen	mg/kg TS	0,8	DIN EN ISO 17294-2
Aschegehalt 550 °C	%	0,1	DIN EN 15403
Atmungsaktivität	mg O ₂ /g TS	-	DIN EN ISO 16072
Benz(a)anthracen	mg/kg TS	0,05	DIN EN 15527 / DIN ISO 18287
Benzo(a)pyren	mg/kg TS	0,05	DIN EN 15527 / DIN ISO 18287
Benzo(b)fluoranthren	mg/kg TS	0,05	DIN EN 15527 / DIN ISO 18287
Benzo(g,h,i)perylene	mg/kg TS	0,05	DIN EN 15527 / DIN ISO 18287
Benzo(k)fluoranthren	mg/kg TS	0,05	DIN EN 15527 / DIN ISO 18287
Blei	mg/kg TS	2	DIN EN ISO 17294-2
Brennwert (Ho)	MJ/kg OS	0,2	analog DIN EN 15400
Brennwert (Ho)	MJ/kg TS	0,2	analog DIN EN 15400
Cadmium	mg/kg TS	0,2	DIN EN ISO 17294-2
Chlor, gesamt	% TS	0,1	DIN EN 15408 / DIN EN ISO 10304-1/-2
Chrom, gesamt	mg/kg TS	1	DIN EN ISO 17294-2
Chrysen	mg/kg TS	0,05	DIN EN 15527 / DIN ISO 18287
Kobalt	mg/kg TS	1	DIN EN ISO 17294-2
Dibenz(a,h)anthracen	mg/kg TS	0,05	DIN EN 15527 / DIN ISO 18287
EOX	mg/kg TS	1	DIN 38414-S17
Fluoranthren	mg/kg TS	0,05	DIN EN 15527 / DIN ISO 18287
Fluoren	mg/kg TS	0,05	DIN EN 15527 / DIN ISO 18287
Gasbildungsrate	NI/kg TS	-	DIN EN 38414 Teil 8
Gesamtwasser	% OS	0,1	DIN EN 15414-3
Glühverlust	% TS	0,1	DIN EN 15169 DIN EN 12880
Heizwert (Hu)	MJ/kg OS	0,2	Berechnung laut BGS
Heizwert (Hu)	MJ/kg TS	0,2	Berechnung laut BGS
Indeno(1,2,3-cd)pyren	mg/kg TS	0,05	DIN EN 15527 / DIN ISO 18287
Infiltrationsrate	mm/s	-	DIN 19682-7
Kohlenwasserstoffe C10-C22	mg/kg TS	40	DIN EN 14039, LAGA KW 04
Kohlenwasserstoffe C10-C40	mg/kg TS	40	DIN EN 14039, LAGA KW 04
Kupfer	mg/kg TS	1	DIN EN ISO 17294-2
lipophile Stoffe	% OS	0,02	LAGA KW/04
Mangan	mg/kg TS	1	DIN EN ISO 17294-2
Naphthalin	mg/kg TS	0,05	DIN EN 15527 / DIN ISO 18287

Anlage 8-8: Analysemethoden für Feststoffparameter (Teil II)

Nickel	mg/kg TS	1	DIN EN ISO 17294-2
PCB 101	mg/kg TS	0,01	DIN EN 15308 / DIN ISO 10382 (MSD)
PCB 118	mg/kg TS	0,01	DIN EN 15308 / DIN ISO 10382 (MSD)
PCB 138	mg/kg TS	0,01	DIN EN 15308 / DIN ISO 10382 (MSD)
PCB 153	mg/kg TS	0,01	DIN EN 15308 / DIN ISO 10382 (MSD)
PCB 180	mg/kg TS	0,01	DIN EN 15308 / DIN ISO 10382 (MSD)
PCB 28	mg/kg TS	0,01	DIN EN 15308 / DIN ISO 10382 (MSD)
PCB 52	mg/kg TS	0,01	DIN EN 15308 / DIN ISO 10382 (MSD)
Phenanthren	mg/kg TS	0,05	DIN EN 15527 / DIN ISO 18287
Proctordichte	Mg/m ³	-	DIN 18127
Pyren	mg/kg TS	0,05	DIN EN 15527 / DIN ISO 18287
Quecksilber	mg/kg TS	0,07	DIN EN ISO 16772/DIN EN 1483 DIN EN ISO 17294-2
Schwefel, gesamt	mg/kg OS	50	DIN EN 15408 / DIN EN ISO 10304-1/-2
Selbsterhitzung	°C	-	DIN EN 16087 Teil 2
Summe 6 PCB	mg/kg TS	-	berechnet
Summe 7 PCB	mg/kg TS	-	berechnet
Summe PAK (15), ohne Naphthalin	mg/kg TS	-	berechnet
Summe PAK	mg/kg TS	-	berechnet
Temperatur	°C	-	-
Thallium	mg/kg TS	0,2	DIN EN ISO 17294-2
TOC	% TS	0,1	DIN EN 13137
Trockenmasse	%	0,1	DIN EN 14346 DIN EN 12880
Vanadium	mg/kg TS	1	DIN EN ISO 17294-2
Zink	mg/kg TS	1	DIN EN ISO 17294-2

Anlage 8-9: Analysemethoden für Eluatparameter

Parameter	Einheit	BG	Methode Einstufung
Antimon	mg/l	0,001	DIN EN ISO 17294-2
Arsen	µg/l	1	DIN EN ISO 17294-2
Barium	mg/l	0,001	DIN EN ISO 17294-2
Blei	µg/l	1	DIN EN ISO 17294-2
Cadmium	µg/l	0,3	DIN EN ISO 17294-2
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	mg/l	15	DIN 38409-41
Chlorid	mg/l	1	DIN EN ISO 10304-1/2
Chrom, gesamt	µg/l	1	DIN EN ISO 17294-2
Cyanid, leicht freisetzbar	mg/l	0,005	DIN EN ISO 14403
DOC	mg/l	1	DIN EN 1484
Eisen	mg/l	0,2	DIN 38406 - 1
Elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	-	DIN EN ISO 27888
Fluorid	mg/l	2	DIN EN ISO 10304-1/2
Gelöster organischer Kohlenstoff	mg/l	3	DIN EN 1484
Gesamtgehalt an gelösten Feststoffen	mg/l	50	DIN EN 15216 DIN 38409-H1
Kupfer	µg/l	5	DIN EN ISO 17294-2
Molybdän	mg/l	0,001	DIN EN ISO 17294-2
Nickel	µg/l	1	DIN EN ISO 17294-2
Nitrit	mg/l	0,6	EN ISO 26777
Ortho- Phosphat	mg/l	0,5	DIN EN ISO 6878:2004-09
Phenolindex	µg/l	10	DIN EN ISO 14402
pH-Wert	-	-	DIN 38404-C5 DIN EN ISO 10523
Quecksilber	µg/l	0,2	DIN EN 1483 DIN EN ISO 12846
Selen	mg/l	0,001	DIN EN ISO 17294-2
Stickstoff, gesamt	mg/l	1	EN ISO 11905-1
Sulfat	mg/l	1	DIN EN ISO 10304-1/2
Zink	µg/l	10	DIN EN ISO 17294-2

Anlage 8-10: Methoden zur Bestimmung der Nährstoffgehalte sowie die Zusammensetzung der organischen Substanz

Parameter	Methoden
Trockenrückstand/Wassergehalt im Schlamm	DIN EN 13040
Pflanzennährstoffe	Methodenbuch BGK e.V.
Metalle/Elemente in Feststoff (ICP-OES/ICP-MS)	ISO 11885/ISO 16772/ISO17294-2
ADF, NDF, ADL VDLUFA (Van Soest Analyse)	Methodenbuch III (1993)

Anlage 8-11: Methoden zur Bestimmung der bautechnischen Anforderungen

Parameter	Einheit	Methode
Probenaufbereitung		DIN EN 932-2
Stoffliche Zusammensetzung	%	DIN EN 933-11
Korngrößenverteilung	%	DIN EN 933-1
Kornformzahl	%	DIN EN 933-4
Bruchflächigkeit	%	DIN EN 933-5
Fließkoeffizienten	-	DIN EN 933-6
Schlagzertrümmerungswert	%	DIN EN 1097-6
Kornrohdichte	Mg/ m ³	DIN EN 1097-6
Wasseraufnahme	%	DIN EN 1097-6
Widerstand gegen Frost- Tau- Wechsel	%	DIN EN 1367-1

Ergebnisse und Auswertung

Anlage 8-12: Korngrößenfraktionen für Böden (DIN EN ISO 14688 -1⁷:2013 – 1)

Bodenart	Korngröße [mm]
Sand	> 0,063 – 2,0
• Grobsand	• > 0,63 – 2,0
• Mittelsand	• > 0,2 – 0,63
• Feinsand	• > 0,063 – 0,2
Schluff	> 0,002 – 0,063
• Grobschluff	• > 0,02 – 0,063
• Mittelschluff	• > 0,0063 – 0,02
• Feinschluff	• > 0,002 – 0,0062
Ton	< 0,002

Anlage 8-13: Massenströme < 25 mm

Massenströme < 25 mm 25%/ 75%- Quantil Ausreißerkriterium = 1,5* Interquartilsabstand				
	Leichtgut	Schwergut	Feingut	Prozesswasser
Menge n	n = 8	n = 8	n = 8	n = 8
Minimum	50,8	7,6	8,5	11,1
25% Quantil	58,0	7,7	13,4	12,6
50% Quantil (Median)	53,9	9,3	17,0	15,3
75% Quantil	51,6	10,9	21,6	26,0
Maximum	60,0	14,9	23,2	29,4

Anlage 8-14: Massenströme < 60 mm

Massenströme < 60 mm 25%/ 75%- Quantil Ausreißerkriterium = 1,5* Interquartilsabstand				
	Leichtgut	Schwergut	Feingut	Prozesswasser
Menge n	n = 6	n = 6	n = 6	n = 6
Minimum	33,5	14,5	15,4	1,3
25% Quantil	34,1	17,2	21,1	9,4
50% Quantil (Median)	39,7	20,9	24,9	14,2
75% Quantil	43,2	22,0	31,8	19,6
Maximum	46,2	29,0	34,8	27,6

Anlage 8-15: Massenströme 10 - 60 mm

Massenströme 10 - 60 mm				
	Leichtgut	Schwergut	Feingut	Prozesswasser
Menge n	n = 1	n = 1	n = 1	n = 1
Wert	37,1	35,7	21,6	5,5

⁷ „Wiedergegeben mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Maßgebend für das Anwenden der DIN-Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.“

Anlage 8-16: Ermittelte Massenbilanzen der Einzelversuche (Teil I)

Datum	Fraktion	Frischwasser (FW) Brauchwasser (BW)		Leichtgut	Schwergut	Feingut	Feststoffgehalt im Prozesswasser (V = 1,5 m³)	Gesamt- masse
06.03.2014	< 25 mm	BW	Frischsubstanz [kg]	539,20	42,65	156,50	-	-
			TS- Gehalt [%]	0,55	0,90	0,71	0,04	-
			Trockemasse [kg]	296,56	38,39	111,12	60,00	506,06
			Massenanteil [%]	58,60	7,59	21,96	11,86	100
11.03.2014	< 25 mm	BW	Frischsubstanz [kg]	655,20	52,96	72,00	-	-
			TS- Gehalt [%]	0,53	0,93	0,75	0,125	-
			Trockemasse [kg]	347,26	49,25	54,00	187,50	638,0088
			Massenanteil [%]	54,43	7,72	8,46	29,39	100
18.03.2014	< 25 mm	FW	Frischsubstanz [kg]	353,40	49,15	83,00	-	-
			TS- Gehalt [%]	0,55	0,80	0,72	0,03	-
			Trockemasse [kg]	194,37	39,32	59,76	45,00	338,45
			Massenanteil [%]	57,43	11,62	17,66	13,30	100
25.03.2014	< 25 mm	BW	Frischsubstanz [kg]	482,48	88,80	183,10	-	-
			TS- Gehalt [%]	0,54	0,86	0,65	0,04	-
			Trockemasse [kg]	260,54	76,37	119,02	57,00	512,9222
			Massenanteil [%]	50,80	14,89	23,20	11,11	100
01.04.2014 Versuch 1	< 25 mm	FW	Frischsubstanz [kg]	324,46	42,00	69,20	-	-
			TS- Gehalt [%]	0,54	0,84	0,63	0,06	-
			Trockemasse [kg]	175,21	35,28	43,60	-	344,0844
			Massenanteil [%]	50,92	10,25	12,67	26,16	100
01.04.2014 Versuch 2	< 25 mm	FW	Frischsubstanz [kg]	593,40	59,25	146,60	-	-
			TS- Gehalt [%]	0,61	0,89	0,67	0,06	-
			Trockemasse [kg]	361,97	52,73	98,22	90,00	602,9285
			Massenanteil [%]	60,04	8,75	16,29	14,93	100
02.04.2014	< 25 mm	FW	Frischsubstanz [kg]	387,00	36,20	90,00	-	-
			TS- Gehalt [%]	0,55	0,86	0,64	0,07	-
			Trockemasse [kg]	212,85	31,13	57,60	105,00	406,582
			Massenanteil [%]	52,35	7,66	14,17	25,83	100
08.04.2014	< 25 mm	BW	Frischsubstanz [kg]	324,30	35,20	101,00	-	-
			TS- Gehalt [%]	0,55	0,93	0,70	0,04	-
			Trockemasse [kg]	178,37	32,74	70,70	52,50	334,301
			Massenanteil [%]	53,35	9,79	21,15	15,70	100

Anlage 8-16: *Ermittelte Massenbilanzen der Einzelversuche (Teil II)*

Datum	Fraktion	Frischwasser (FW) Brauchwasser (BW)		Leichtgut	Schwergut	Feingut	Feststoffgehalt im Prozesswasser (V = 1,5 m³)	Gesamt- masse
15.04.2014	< 60 mm	FW	Frischsubstanz [kg]	395,66	142,00	91,60	-	-
			TS- Gehalt [%]	0,52	0,91	0,75	0,03	-
			Trockemasse [kg]	205,74	129,22	68,70	42,00	445,6632
			Massenanteil [%]	46,17	28,99	15,42	9,42	100
07.05.2014 Versuch 1	< 60 mm	FW	Frischsubstanz [kg]	306,20	123,73	178,80	-	-
			TS- Gehalt [%]	0,56	0,87	0,74	0,07	-
			Trockemasse [kg]	171,47	107,65	132,31	100,50	511,9291
			Massenanteil [%]	33,50	21,03	25,85	19,63	100
07.05.2014 Versuch 2	< 60 mm	FW	Frischsubstanz [kg]	337,30	128,50	182,90	-	-
			TS- Gehalt [%]	0,60	0,89	0,68	0,05	-
			Trockemasse [kg]	202,38	114,37	124,37	78,00	519,117
			Massenanteil [%]	38,99	22,03	23,96	15,03	100
08.05.2014 Versuch 1	< 60 mm	BW	Frischsubstanz [kg]	356,00	86,70	169,70	-	-
			TS- Gehalt [%]	0,45	0,89	0,76	0,003	-
			Trockemasse [kg]	160,20	77,16	128,97	4,80	371,135
			Massenanteil [%]	43,16	20,79	34,75	1,29	100
08.05.2014 Versuch 2	< 60 mm	FW	Frischsubstanz [kg]	223,50	74,60	123,60	-	-
			TS- Gehalt [%]	0,58	0,88	0,65	0,07	-
			Trockemasse [kg]	129,63	65,65	80,34	105,00	380,618
			Massenanteil [%]	34,06	17,25	21,11	27,59	100
13.05.2014* Versuch 1*	< 60 mm	FW	Frischsubstanz [kg]	211,10	75,00	0,00	-	-
			TS- Gehalt [%]	-	-	-	-	-
			Trockemasse [kg]	-	-	-	-	-
			Massenanteil [%]	-	-	-	-	-
20.05.2014*	< 60 mm	FW	Frischsubstanz [kg]	307,10	103,00	0,00	-	-
			TS- Gehalt [%]	-	-	-	-	-
			Trockemasse [kg]	-	-	-	0,08	-
			Massenanteil [%]	44,59	24,30	0,00	31,11	100

* Zyklon verstopft. Versuche nicht in Massenbilanzierung aufgenommen.

Anlage 8-16: *Ermittelte Massenbilanzen der Einzelversuche (Teil III)*

Datum	Fraktion	Frischwasser (FW) Brauchwasser (BW)		Leichtgut	Schwertgut	Feingut	Feststoffgehalt im Prozesswasser (V = 1,5 m³)	Gesamt- masse
21.05.2014	< 60 mm	FW	Frischsubstanz [kg]	358,50	76,90	202,80	-	-
			TS- Gehalt [%]	0,54	0,90	0,75	0,04	-
			Trockemasse [kg]	193,59	69,21	152,10	63,75	478,65
			Massenanteil [%]	40,45	14,46	31,78	13,32	100
27.05.2014	10 - 60 mm	FW	Frischsubstanz [kg]	183,90	129,00	95,00	-	-
			TS- Gehalt [%]	0,62	0,85	0,70	0,01	-
			Trockemasse [kg]	114,02	109,65	66,50	17,10	307,268
			Massenanteil [%]	37,11	35,69	21,64	5,57	100

Anlage 8-17: Stoffströme der Fraktion < 25 mm (Frischsubstanz)

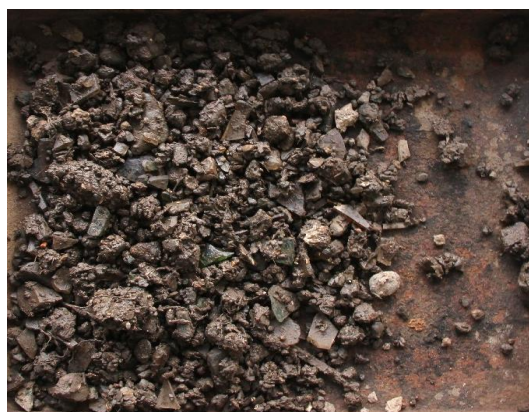
Input: 01.04.2014 (< 25 mm)



Leichtgut 01.04.2014 (< 25 mm)



Schwergut 01.04.2014 (< 25 mm)



Anlage 8-18: Glühverlust < 25 mm

Glühverlust < 25 mm [%] 25%/ 75%- Quantil Ausreißerkriterium = 1,5* Interquartilsabstand					
	Input	Leichtgut	Schwergut	Feingut	Prozess- wasser
Menge n	n = 23	n = 18	n = 19	n = 8	n = 8
Minimum	14,5	17,7	2,9	6,1	22,0
25% Quantil	17,9	21,1	4,0	7,5	23,7
50% Quantil (Median)	19,5	22,3	4,6	10,1	24,6
75% Quantil	20,7	26,7	5,6	12,6	29,8
Maximum	23,8	32,1	6,7	13,5	33,4

Anlage 8-19: Stoffströme der Fraktion < 60 mm (Frischsubstanz)

Input: 21.05.2014 (< 60 mm)



Leichtgut 21.05.2014 (< 60 mm)



Schwergut 21.05.2014 (< 60 mm)



Anlage 8-20: Glühverlust < 60 mm

Glühverlust < 60 mm [%] 25%/ 75%- Quantil Ausreißerkriterium = 1,5* Interquartilsabstand					
	Input	Leichtgut	Schwergut	Feingut	Prozess- wasser
Menge n	27	15	14	6	6
Minimum	8,52	31,50	3,92	3,62	21,45
25% Quantil	19,04	35,59	4,75	4,81	21,63
50% Quantil (Median)	23,22	38,38	6,05	7,88	24,8
75% Quantil	28,18	41,03	7,32	8,77	26,5
Maximum	40,09	44,35	10,38	10,29	26,5

Anlage 8-21: Stoffströme der Fraktion 10 - 60 mm (Frischsubstanz)

Input: 27.05.2014 (10 - 60 mm)



Leichtgut 27.05.2014 (10 - 60 mm)



Schwergut 27.05.2014 (10 - 60 mm)



Anlage 8-22: Glühverlust 10 - 60 mm

Glühverlust 10 - 60 mm [%] 25%/ 75%- Quantil Ausreißerkriterium = 1,5* Interquartilsabstand						
	Input	Leicht- gut	Schwergut	Feingut	Boden- fraktion	Prozess- wasser
Menge n	n = 5	n = 16	n = 16	n = 11	n = 13	n = 9
Minimum	23,4	43,2	2,5	4,6	18,2	25,4
25% Quantil	23,9	46,8	3,5	5,2	20,0	26,4
50% Quantil (Median)	23,9	51,7	3,9	5,3	20,5	27,2
75% Quantil	23,9	61,2	4,4	5,7	21,4	27,8
Maximum	24,1	67,6	5,6	5,7	22,3	27,8

Anlage 8-23: Schadstoffverteilung organischer Schadstoffe im Feststoff

Schadstoffverteilung (Organische Schadstoffe im Feststoff) [mg/kg]				
25%/ 75%- Quantil				
Ausreißerkriterium = 1,5* Interquartilsabstand				
	Input	Leichtgut	Schwergut	Feingut
Menge n	7	7	11	6
Kohlenwasserstoffe				
Minimum	780	870	210	280
25% Quantil	850	1100	230	310
50% Quantil (Median)	1100	2000	290	370
75% Quantil	1100	2300	500	510
Maximum	1100	2800	520	540
EOX				
Minimum	4,0	6,0	1	1
25% Quantil	4,0	7,0	1	1
50% Quantil (Median)	6,0	23,0	1	1
75% Quantil	10,0	53,0	2	3
Maximum	10,0	69,0	2	4
Summe PAK				
Minimum	3,74	7,79	1,47	3,4
25% Quantil	6,15	9,09	4,10	4,9
50% Quantil (Median)	10,6	16,4	6,38	6,38
75% Quantil	15,4	24,2	13,5	8,00
Maximum	26,1	26,4	19,4	9,6
Summe 6 PCB				
Minimum	0,31	0,35	0,01	0,17
25% Quantil	0,41	0,37	0,08	0,26
50% Quantil (Median)	0,65	0,97	0,14	0,70
75% Quantil	0,9	1,43	0,24	0,78
Maximum	0,92	1,46	0,34	0,9

Anlage 8-24: Schadstoffverteilung der Schwermetalle im Feststoff (Teil I)

Schadstoffverteilung (Schwermetalle im Feststoff) [mg/kg]				
25%/ 75%- Quantil				
Ausreißerkriterium = 1,5* Interquartilsabstand				
	Input	Leichtgut	Schwergut	Feingut
Menge n	7	7	11	6
Arsen				
Minimum	9,7	5,6	7,5	8,5
25% Quantil	10,7	7,9	8,7	9,7
50% Quantil (Median)	12,5	12,4	9,15	10,9
75% Quantil	14,0	12,7	12,6	12,8
Maximum	14,8	19,4	12,6	13,7
Blei				
Minimum	121,0	111,0	64,0	221,0
25% Quantil	129,0	138,0	110,0	226,0
50% Quantil (Median)	271,0	182,0	164,0	252,0
75% Quantil	303,0	237,0	497,0	314,0
Maximum	345,0	248,0	497,0	314,0
Cadmium				
Minimum	1,6	2,1	0,4	2,8
25% Quantil	1,8	2,7	0,5	2,9
50% Quantil (Median)	2,1	3,2	0,9	2,9
75% Quantil	3,7	3,4	1,9	3,9
Maximum	3,7	3,4	2,0	3,9
Chrom- Gesamt				
Minimum	75,0	101,0	24,0	113,0
25% Quantil	81,0	102,0	29,0	134,0
50% Quantil (Median)	122,0	113,0	89,0	146,0
75% Quantil	200,0	233,0	129,0	504,0
Maximum	351,0	343,0	242,0	670,0
Kupfer				
Minimum	215,0	288,0	51,0	269,0
25% Quantil	244,0	626,0	143,0	419,0
50% Quantil (Median)	289,0	952,0	269,0	467,0
75% Quantil	864,0	2870,0	1220,0	1520,0
Maximum	864,0	2870,0	1500,0	1520,0

Anlage 8-24: Schadstoffverteilung der Schwermetalle im Feststoff (Teil II)

Schadstoffverteilung (Schwermetalle im Feststoff) [mg/kg]				
25%/ 75%- Quantil				
Ausreißerkriterium = 1,5* Interquartilsabstand				
Nickel				
Minimum	56,0	64,0	21,0	75,0
25% Quantil	58,0	67,0	39,0	90,0
50% Quantil (Median)	71,0	74,0	63,0	104,0
75% Quantil	79,0	129,0	145,0	257,0
Maximum	79,0	129,0	225,0	405,0
Quecksilber				
Minimum	0,33	0,35	0,07	0,24
25% Quantil	0,38	0,38	0,08	0,35
50% Quantil (Median)	0,54	0,54	0,1	0,39
75% Quantil	0,71	0,55	0,15	0,45
Maximum	0,90	0,57	0,19	0,53
Zink				
Minimum	766,0	788,0	302,0	831,0
25% Quantil	826,0	1080,0	532,0	106,0
50% Quantil (Median)	920,0	1190,0	1310,0	117,0
75% Quantil	1050,0	1550,0	1960,0	258,0
Maximum	1050,0	1550,0	2610,0	2640,0

Anlage 8-25: Schadstoffverteilung im Eluat

Schadstoffverteilung (Eluatparameter) [mg/l]				
25%/ 75%- Quantil				
Ausreißerkriterium = 1,5* Interquartilsabstand				
	Input	Leichtgut	Schwergut	Feingut
Menge n	7	7	11	6
Elektrische Leitfähigkeit				
Minimum	2330,0	810,0	295,0	927,0
25% Quantil	2330,0	968,0	365,0	954,0
50% Quantil (Median)	2390,0	1170,0	448,0	1360,0
75% Quantil	2590,0	1740,0	677,0	2360,0
Maximum	2630,0	2330,0	1040,0	2610,0
Chlorid				
Minimum	72,0	23,0	3,0	7,0
25% Quantil	72,0	33,0	11,0	8,0
50% Quantil (Median)	75,0	54,0	16,0	11,5
75% Quantil	85,0	87,0	20,0	16,0
Maximum	87,0	102,0	25,0	16,0
Sulfat				
Minimum	772,0	260,0	44,0	412,0
25% Quantil	772,0	330,0	63,0	416,0
50% Quantil (Median)	917,0	403,0	99,0	712,0
75% Quantil	951,0	629,0	182,0	1420,0
Maximum	1070,0	777,0	287,0	1590,0

Anlage 8-26: Verteilung der Schwermetalle im Eluat

Schadstoffverteilung (Schwermetalle im Eluat) [mg/l]				
25%/ 75%- Quantil				
Ausreißerkriterium = 1,5* Interquartilsabstand				
	Input	Leichtgut	Schwergut	Feingut
Menge n	7	7	11	6
Kupfer				
Minimum	47,0	23,0	9,0	42,0
25% Quantil	48,0	32,0	16,0	42,0
50% Quantil (Median)	62,0	45,0	26,0	49,0
75% Quantil	71,0	54,0	52,0	55,0
Maximum	72,0	84,0	75,0	66,0
Nickel				
Minimum	17,0	8,0	1,0	5,0
25% Quantil	18,0	8,0	2,0	7,0
50% Quantil (Median)	20,0	10,0	3,0	9,0
75% Quantil	21,0	16,0	3,0	13,0
Maximum	21,0	17,0	4,0	14,0
Zink				
Minimum	30,0	20,0	10,0	20,0
25% Quantil	110,0	30,0	10,0	20,0
50% Quantil (Median)	140,0	60,0	10,0	45,0
75% Quantil	170,0	90,0	20,0	140,0
Maximum	210,0	110,0	20,0	140,0

Anlage 8-27: Reinigungsleistung

Reinigungsleistung bezüglich des Schwergutes < 25 mm und < 60 mm [mg/l] 25%/ 75%- Quantil Ausreißerkriterium = 1,5* Interquartilsabstand		
	Schwergut aus Aufgabegut	Schwergutaustrag
Menge n	5	7
Elektrische Leitfähigkeit		
Minimum	480	295
25% Quantil	625	365
50% Quantil (Median)	727	501
75% Quantil	841	677
Maximum	845	982
Chlorid		
Minimum	8	3
25% Quantil	10	7
50% Quantil (Median)	19	15
75% Quantil	22	20
Maximum	24	21
Sulfat		
Minimum	233	61
25% Quantil	233	63
50% Quantil (Median)	238	103
75% Quantil	272	182
Maximum	295	287

Anlage 8-28: Wassergehalte der einzelnen Stoffströme aus der Aufbereitung des Aufgabegutes
10 - 60 mm

	Schwergut	Feingut	Leichtgut	Bodenfraktion
Menge	n = 8	n = 10	n = 10	n = 8
Minimum	0,95	17,82	19,51	9,22
25% Quantil	1,09	18,79	26,66	13,09
50% Quantil (Median)	3,66	19,29	28,05	20,81
75% Quantil	6,38	19,8	33,15	29,16
Maximum	6,45	20	37,95	33,94

Anlage 8-29: Glühverluste und Gesamtkohlenstoffgehalte der Anhaftungen

	Einheit	Schwergut	Feingut
GV	%	3,79	23,00
		7,33	23,15
		7,85	24,25
		8,25	44,47
		8,41	47,13
		9,19	62,15
TOC		2,11	6,57
		2,51	7,23
		2,57	7,84

Anlage 8-30: Auswertung der Sandwäscheversuche

Auswertung der Sandwäscheversuche 25%/ 75%- Quantil Ausreißerkriterium = 1,5* Interquartilsabstand			
	Sand ungewaschen	Sand 1 x gewaschen	Sand 2 x gewaschen
Menge n	20	15	6
Glühverlust			
Minimum	7,2	3,0	3,1
25% Quantil	7,4	4,4	3,2
50% Quantil (Median)	7,5	5,6	3,3
75% Quantil	7,9	6,8	3,4
Maximum	8,6	10,3	3,6
Elektrische Leitfähigkeit			
Menge n	10	10	5
Minimum	1301	693	506
25% Quantil	1329	720	506
50% Quantil (Median)	1345	743	514
75% Quantil	1374	880	517
Maximum	1437	899	523
Sulfat			
Menge n	10	10	5
Minimum	643	348	242
25% Quantil	652	366	242
50% Quantil (Median)	677	404	245
75% Quantil	696	492	246
Maximum	745	494	252

Anlage 8-31: Massenanteil der magnetisierbaren Komponenten im Feingutaustrag

Anteil magnetischer Bestandteile im Feingutaustrag 25%/ 75%- Quantil Ausreißerkriterium = 1,5* Interquartilsabstand	
Menge n	8
Minimum	1,04
25% Quantil	1,66
50% Quantil (Median)	1,96
75% Quantil	2,65
Maximum	3,04

Anlage 8-32: Umrechnung der Schadstoffgehalte gemäß RAL-GZ 724⁸

Ermittelte Schwermetallgehalte in mg/kg TS						
Parameter	Einheit	Leichtgut 10 - 60 mm			Schwermetallgehalte nach RAL- GZ 724	
		Probe I	Probe II	Probe III	Medianwert	„80 % Perzentil“ Wert
		-	-	-	-	-
Heizwert (Hu)	MJ/kg TS	22,57	26,22	23,91	-	-
Cadmium	mg/kg TS	32	24	5,4	-	-
Quecksilber		1,1	0,78	0,57	-	-
Thallium		< 0,2	< 0,2	< 0,2	-	-
Arsen		5,4	4,6	4,5	-	-
Kobalt		6	5	6	-	-
Nickel		33	37	57	-	-
Antimon		36	380	98	-	-
Blei		1020	226	458	-	-
Chrom		118	88	85	-	-
Mangan		164	111	151	-	-
Vanadium		17	16	11	-	-
Zinn		50	196	41	-	-
Umrechnung auf Schwermetallgehalt pro Energiegehalt						
Cadmium	mg/ MJ TS	1,42	0,92	0,23	0,25	0,56
Quecksilber		0,05	0,03	0,02	0,038	0,075
Thallium		< 0,0088	< 0,0076	< 0,0083	0,063	0,13
Arsen		0,24	0,18	0,19	0,31	0,81
Kobalt		0,27	0,19	0,25	0,38	0,75
Nickel		1,46	1,41	2,38	5	10
Antimon		1,60	14,49	4,10	3,1	7,5
Blei		45,19	8,62	19,16	12	25
Chrom		5,23	3,36	3,55	7,8	16
Mangan		7,27	4,23	6,32	16	31
Vanadium		0,75	0,61	0,46	0,63	1,6
Zinn		2,22	7,48	1,71	1,9	4,4

⁸ Die Auszugsweise Wiedergabe der Tabelle 3 der Gütesicherung, RAL- GZ erfolgt mit Genehmigung von RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V. © Alle Rechte- auch Übersetzung in andere Sprachen- liegen bei RAL.

Anlage 8-33: Trockensubstanz und Glühverluste verschiedener Prozesswässer

Aufgabegut	< 60 mm	10 - 60 mm
Menge n	5	9
Trockensubstanzgehalt [%]		
Minimum	4,83	1,31
25% Quantil	7,25	1,33
50% Quantil (Median)	7,56	1,45
75% Quantil	9,13	1,51
Maximum	9,17	1,55
Glühverlust [%]		
Minimum	22,71	25,47
25% Quantil	22,71	26,41
50% Quantil (Median)	22,93	27,24
75% Quantil	23,40	27,83
Maximum	24,23	27,84
25%/ 75%- Quantil Ausreißerkriterium = 1,5* Interquartilsabstand		

Anlage 8-34: Wasseranalytische Parameter verschiedener Prozesswässer

Aufgabegut	< 60 mm	10 - 60 mm
pH- Wert [-]		
Menge n	5	9
Minimum	6,76	7,44
25% Quantil	6,77	7,46
50% Quantil (Median)	6,78	7,47
75% Quantil	6,78	7,47
Maximum	6,81	7,5
Vergleichswert (n = 1)		
Destilliertes Wasser	5,04	
Leitungswasser	7,76	
Redoxpotenzial [mV]		
Menge n	5	8
Minimum	-9,10	-27,60
25% Quantil	-10,10	-29,00
50% Quantil (Median)	-10,70	-29,45
75% Quantil	-11,00	-30,70
Maximum	-12,10	-31,60
Vergleichswert (n = 1)		
Destilliertes Wasser	89,50	
Leitungswasser	68,20	
Elektrische Leitfähigkeit [mS/cm]		
Menge n	5	9
Minimum	2,96	0,71
25% Quantil	3,53	0,72
50% Quantil (Median)	3,87	0,75
75% Quantil	4,04	0,95
Maximum	4,51	1,12
Vergleichswert (n = 1)		
Destilliertes Wasser	0,05	
Leitungswasser	0,35	
25%/ 75%- Quantil; Ausreißerkriterium = 1,5* Interquartilsabstand		

Anlage 8-35: Volumenreduktion

Der nachfolgende Abschnitt dient der überschlägigen Ermittlung des theoretischen Volumengewinnes für verschiedene Szenarien am Beispiel der Deponie Pohlsche Heide. Betrachtet werden dabei verschiedene Szenarien, welche die Umlagerung des gesamten Deponates sowie die Wiederablagerung der Feinfraktion < 60 mm beziehungsweise der bodenähnlichen Fraktion < 10 mm berücksichtigen.

Der Volumengewinn berechnet sich gemäß Formel 8-1 und wird durch die Einbaudichte des Deponates zur Wiederablagerung in Form der Trockendichte und der Ablagerungsmasse bestimmt. Beeinflusst wird die Einbaudichte im Wesentlichen durch materialbedingte Faktoren wie zum Beispiel die Abfallzusammensetzung und die Korngrößenverteilung, dem Wassergehalt aber auch durch die Art des Einbaus, in Abhängigkeit der Schichtdicke des eingebauten Deponates beziehungsweise der verwendeten Kompaktoren (Brammer et al., 1997).

$$\Delta V = \left(1 - \left(\frac{M_{neu}}{M_{alt}} * \frac{\rho_{alt}}{\rho_{neu}} \right) \right) * 100 \quad \text{Formel 8-1}$$

Der Parameter ρ_{alt} entspricht der Einbaudichte des Deponats als Trockendichte im Deponiekörper und liegt im Bereich zwischen 0,6 – 1,1 Mg/m³ (Münnich et al., 2015). Für die hier durchgeführten Berechnungen wurde die Einbaudichte für alle Szenarien mit $\rho_{alt} = 0,8 \text{ Mg/m}^3$ angenommen. Der Parameter ρ_{neu} entspricht der Trockendichte des Materials nach dem Wiedereinbau in den Deponiekörper. Da die Einbaudichte zumeist nicht bekannt ist kann diese entweder mit der Formel

$$\rho_{neu} = 0,8 * \rho_{alt} + 0,4 \quad \text{Formel 8-2}$$

abgeschätzt werden (Brammer et al., 1997) oder mittels Proctorversuch nach DIN 18127 (2012) bestimmt werden.

Der verwendete Ansatz zur Bestimmung des Volumengewinnes hat vor allem für Hausmüll Gültigkeit. Nicht anwendbar ist dieser Ansatz für Deponat mit hohem Anteil an Bauschutt beziehungsweise inerte Materialien wie beispielsweise Böden, da sich hier die Einbaudichte aufgrund von Verdichtung nur unwesentlich ändert (Brammer et al., 1997). Eine Anwendung der Gleichung A 4.3-2 zur Bestimmung der Einbaudichte der Fraktion < 60 mm beziehungsweise < 10 mm bei Wiederablagerung kann aufgrund der Zunahme des Bodenanteils nicht stattfinden (Münnich et al., 2015), weshalb für die Einbaudichte der Ansatz $\rho_{neu} = 0,9 * \rho_{Proctor}$ verwendet wurde.

Die für die überschlägige Ermittlung des Volumengewinnes benötigten Randbedingungen sowie Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt.

Anlage 8-36: Theoretischer Volumengewinn

	Szenario I Umlagerung	Szenario II Ablagerung < 60 mm	Szenario III Ablagerung < 10 mm
$M_{alt} [Mg_{FS}]^*$	2503890	2503890	2503890
Trockensubstanz- gehalt [%]	0,7	0,7	0,7
$M_{alt} [Mg_{TS}]$	1752723	1752723	1752723
$M_{neu} [Mg_{TS}]$	1752723	$= 0,63 * M_{alt} = 1104215$	$= 0,33 * M_{alt} = 578398$
$\rho_{alt} [Mg_{TS}/m^3]$	0,8	0,8	0,8
$\rho_{neu} [Mg_{TS}/m^3]$	$r_{neu} = 0,8 * \rho_{alt} + 0,4$	$\rho_{neu} = 0,9 * \rho_{Proctor}$	
$\rho_{Proctor} [Mg_{TS}/m^3]$	-	0,96	1,11
$\rho_{neu} [Mg_{TS}/m^3]$	1,04	0,86	1,00
ΔV [%]	23	47	76
Siehe Kapitel 3.1.1			

Die Reduktion des Volumens bei der Wiederablagerung des gesamten Deponates im Szenario I resultiert aus dem Abbau organischer Substanz durch biochemische Prozesse im Deponiekörper, welche auch verantwortlich für die Setzungsprozesse innerhalb des Deponiekörpers sind. Das Material lässt sich infolge der Umlagerung durch die abgebauten organischen Bestandteile bei der Wiederablagerung mit höherer Verdichtung wieder einbauen, was zu einem theoretischen Volumengewinn von 23 Vol. % führt.

Die Aufbereitung der Grobfraction und die Wiederablagerung der Feinfraction < 60 mm im Szenario II bewirkt unter Beachtung der angegebenen Randbedingungen einen Volumengewinn von 47 Vol. %.

Das Szenario III berücksichtigt sowohl die Aufbereitung der Grobfraction als auch der Feinfraction 10 - 60 mm. Insofern die Fraction < 10 mm keiner Verwertung zugeführt werden kann ist diese einer erneuten Deponierung zuzuführen. Der verdichtete Wiedereinbau der Fraction < 10 mm führt unter Beachtung der angegebenen Randbedingungen zu einem Volumengewinn von 76 Vol. %.

ökonomische und ökologische Bewertung

Anlage 8-37: Maschinendaten für die ökologische Bewertung

	Schwert- wäscher	Nasssetz- maschine + Peripherie	Sand-wä- scher	Überband- magnet	Glas-sor- tierer	Zentrifuge
Gesamtgewicht [Mg]	6,8	10	0,4	3,35	2,2	5
Energieverbrauch [kWh]	37	50	5	3	10	35
Stoffliche Zusammensetzung* [%]						
• Stahl	90	90	95	85	75	90
• Kunststoff	5	5	-	7,5	12,5	5
• Gummi	5	5	5	7,5	12,5	5

* Die stoffliche Zusammensetzung ist relevant für die Lasten im Rahmen der Herstellungsphase

* Während der End- of Life Phase wird die Aufbereitung des Stahls als Eisen für die stoffliche Wiederverwertung als Last berücksichtigt. Die Komponenten Gummi und Kunststoffe werden im Rahmen der End- of Life Phase thermisch und als Last berücksichtigt. Eine Berücksichtigung der Strom- oder Wärmenutzung erfolgt nicht

Anlage 8-38: verwendete Datensätze

Phase der ökobilanziellen Betrachtung	Prozess	Beschreibung des verwendeten Datensatzes	Art	Bezugs-land	Herkunft
Betriebsphase	Energieverbrauch	Strommix, Produktion DE	Last	DE	Ecoinvent
	Frischwasserbedarf	Trinkwasser, ab Hausanschluss	Last	CH	Ecoinvent
	Abwasserreinigung	Behandlung Abwasser in Abwasser-reinigung, Gr.Kl.2	Last	CH	Ecoinvent
Produktion	Stahlherstellung	Stahl, niedriglegiert, ab Werk	Last	RER ¹	Ecoinvent
	Kunststoffherstellung	Glasfaser-verstärkter Kunststoff, Polyamid, Spritzguss, ab Werk	Last	RER	Ecoinvent
	Gummiherstellung	Gummi EPDM	Last	RER	Ecoinvent
End of Life	Aufbereitung des Stahls zur Wiederverwendung als Eisen	Eisenschrott ab Werk Sammeln, Transport, Sortieren und Pressen von Blöcken	Last	RER	Ecoinvent
	Entsorgung- Kunststoff	Müll- Kraftwerk DT- DE 2010	Last	D	Gemis
	Entsorgung- Gummi	Müll- Kraftwerk DT- DE 2010	Last	D	Gemis
Verwertung/ Beseitigung der Stoffströme	Wiederablagerung der Reststoffe aus Abwasser-aufbereitung und Sandwäsche	Deponie- Hausmüll	Last	D	Gemis
	Verwertung des Leichtgutaustrages im EBS-Kraftwerk	Müll- Kraftwerk DT- DE 2010	Last	D	Gemis
	Stromnutzung	Strommix, Produktion DE	Gutschrift	DE	Ecoinvent
	Wärmenutzung	Nutzwärme, unspezifisch in Chemiewerk	Gutschrift	RER	Ecoinvent
	Verwertung des Schwergutaustrages	Kies gebrochen, ab Abbau	Gutschrift	CH	Ecoinvent
	Konditionierung des Glases zur weiteren Verwertung	Altglas, aus öffentlichen Sammelstellen, unsortiert	Gutschrift	RER	Ecoinvent
	Verwertung des Feingutaustrages	Sand, ab Abbau	Gutschrift	CH	Ecoinvent
¹ RER Daten beziehen sich auf Anlagen in der EU					